

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Materiales y Fabricación de tablas de surf avanzadas

Autor: Guillermo Arrans Gallardo

Tutor: José María Gallardo Fuentes

Dpto. Ingeniería de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Materiales y Fabricación de tablas de surf avanzadas

Autor:

Guillermo Arrans Gallardo

Tutor:

José María Gallardo Fuentes

Catedrático

Dpto. Ingeniería de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Materiales y Fabricación de tablas de surf avanzadas

Autor: Guillermo Arrans Gallardo
Tutor: José María Gallardo Fuentes

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mi familia, que ha hecho posible que llegue hasta donde estoy hoy. A mis amigos que han hecho más llevadero mi paso por esta escuela. A todos los profesores que realmente se preocupan por sus alumnos, en especial a mi tutor. Y un sentido agradecimiento a Jesús Justo, Jesús Pinto y a los departamentos de Elasticidad y Resistencia de Materiales y de Ingeniería de Materiales por brindarme su ayuda en la realización de los ensayos.

*Guillermo Arrans Gallardo
Sevilla, 2019*

Resumen

El objetivo de este TFG será el de recabar información acerca de los últimos avances (patentes) realizados y las investigaciones (artículos) que se están llevando a cabo en la industria del surf. Además, se ha desarrollado una investigación propia que busca una mejora de las propiedades mecánicas así como una reducción del peso aplicando los conocimientos ingenieriles propios de esta titulación.

Abstract

The aim of this Bachelor thesis is to gather information related to the last developments (patents) accomplished and investigations (articles) carried out in the surfing industry. Furthermore, an own investigation has been performed in search of an improvement in the mechanical properties as well as a weight reduction by means of the engineering knowledge characteristic of this degree.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
1 Introducción	1
1.1 Breve historia del surf y los materiales utilizados	1
1.1.1 Los Inicios	1
1.1.2 1900-1940: La Expansión	3
1.1.3 1940-1960: La aparición del foam	4
1.1.4 1960- : La revolución del Pacífico	4
1.2 Impacto relativo	6
1.2.1 Impacto relativo de la modificación de condiciones hidrodinámicas	6
1.2.2 Impacto relativo del peso en la tabla	6
1.2.3 Impacto relativo de la rigidez longitudinal en la tabla	6
1.2.4 Impacto relativo de la rigidez torsional en la tabla	7
2 Patentes	9
2.1 Modificación de las condiciones hidrodinámicas	9
2.2 Reducción de peso	11
2.3 Rigidez longitudinal	12
2.4 Rigidez torsional	15
3 Artículos	17
3.1 Medio ambientales	17
3.2 Impresión 3D	19
3.3 Superficies biomiméticas	19
4 Investigación	25
4.1 Objetivo	25
4.2 Dimensiones de la probeta	26
4.3 Fabricación	27
4.3.1 Hand lay up	28
4.3.2 Proceso alternativo	29
4.3.3 Refuerzos	31
4.3.4 Corte de las probetas finales	32
4.4 Ensayos de tracción	33
4.4.1 Procedimiento	33
4.4.2 Resultados. Constantes elásticas	35
Probetas 0/90° tratadas en caliente y con vacío	35
Probetas 0/90° tratadas en frío	38
Probetas $\pm 45^\circ$	39
4.4.3 Resultados. Tensión de rotura	41

4.5	Ensayo de calcinación de resina	42
4.5.1	Procedimiento	42
4.5.2	Resultados	43
4.6	Conclusiones	43
Apéndice A Determinación experimental de la rigidez de una lámina		45
A.1	Obtención de E_{11} , E_{22} , ν_{12}	45
A.2	Obtención de G_{12}	46
Apéndice B Determinación experimental de la resistencia de una lámina		49
B.1	Obtención de X_t	49
B.2	Obtención de S	49
Apéndice C Código de MatLab para tratamiento de datos		51
<i>Bibliografía</i>		57
<i>Índice de Figuras</i>		59
<i>Índice de Tablas</i>		61

1 Introducción

A lo largo de la historia, el surf ha tenido una gran importancia en muchas culturas. Sus inicios se remontan al 500 D.C.. Hoy en día las tablas que se utilizan para realizar este deporte son mucho más que mero equipamiento. Son herramientas, un medio que el ser humano utiliza para tranquilizar su necesidad de conectar de nuevo con su naturaleza más primitiva, el mar. Es por esto que la mayoría de aficionados no dudan en invertir casi todos sus ingresos en la práctica de este deporte ancestral, dando lugar a una industria que recauda cerca de 10 mil millones de euros al año, de los cuales 3,1 mil millones son debidos directamente a la venta de equipamiento [13]. Este hecho junto al enorme crecimiento que esta industria viene presentando en los últimos años la convierte en una opción de inversión muy atractiva para fabricantes e investigadores. No obstante, la base científica que ha promovido este crecimiento y sus avances es muy pobre. Esta situación, lejos de ser un problema, proporciona la posibilidad de satisfacer una industria hambrienta de conocimiento, abriendo una gran oportunidad de mercado a cualquier ingeniero o investigador cualificado.

El objetivo de este TFG será, por tanto, el de recabar información acerca de los últimos avances (patentes) realizados y las investigaciones (artículos) que se están llevando a cabo en esta industria. Además, se ha desarrollado una investigación propia que busca una mejora de las propiedades mecánicas así como una reducción del peso aplicando los conocimientos ingenieriles propios de esta titulación.

1.1 Breve historia del surf y los materiales utilizados

1.1.1 Los Inicios

Como se dijo anteriormente, el surf es un deporte más antiguo de lo que la mayoría piensa. Pueden encontrarse pruebas arqueológicas de embarcaciones fabricadas específicamente para este deporte en muchas regiones del mundo. Sin embargo, la Polinesia y Hawaii son comúnmente conocidos como los pioneros en su práctica. No hay muchos datos antes de la era colonial acerca del surf. No obstante, en las expediciones del capitán James Cook a Tahití (1772-1775) y a Hawaii (1776-1779), tanto él como su tripulación ya observaron la práctica de este deporte.

Las tablas en Hawaii eran más grandes y pesadas que en cualquier otro lado, hasta siete metros y setenta kilogramos de peso. En Nueva Zelanda, por el contrario, los relatos describen tablas de menos de dos metros diseñadas para montarlas tumbado más que de pie. En las islas Marquesas y a lo largo de la Melanesia, Micronesia y Polinesia, las tablas que los europeos observaron no eran mucho mayores, de 1,2 metros de longitud.

A pesar de la existencia de muchas teorías, hoy en día es ampliamente reconocido que el uso de embarcaciones especialmente fabricadas para el surf data del año 500 D.C.. En un principio, las tablas se consideraban símbolos religiosos benditos, fabricados a partir de conocimientos hidrodinámicos avanzados que eran transmitidos a través del *moólelo* (canciones e historias culturales hawaianas). El interés de los hawaianos por conocer el comportamiento de distintas formas de tablas en el agua surgió a raíz de una vida isleña en sintonía con el océano. Las primeras tablas fueron construidas principalmente a partir de tres tipos distintos de madera: acacia (*koa*) que era la más pesada y abundante, árboles del pan (*ulu*) y *erythrina sandwicensis* (*wili-wili*) la más popular por su ligero peso, su color y su alta flotabilidad.

Aunque los expertos difieren a la hora de estimar la cantidad de tipos de tablas que existían, destacan cuatro tipos principalmente a los que se aplicaban variaciones en función del usuario.

La *Olo* era la más grande ypreciada por los hawaianos. Ésto era debido tanto a sus enormes dimensiones de hasta siete metros como a que era fabricado con la preciada madera *wili-wili*. Esta tabla era usada por los hawaianos para coger olas pequeñas en línea recta hasta la orilla.

Otra variante era la *Alaia*, más corta (dos a tres metros) y algo más ancha, diseñada para olas más exigentes que requerían mayor maniobrabilidad. La *Alaia* se convertiría en la precursora de las tablas de surf modernas, tanto en aspecto como en propósito.

En un punto medio entre las dos últimas, se encontraba la *Kikoó*, algo menos maniobrable que la *Alaia* y también menos común. En la figura 1.1 nos encontramos recreaciones aproximadas de estas tres tablas.



Figura 1.1 Recreaciones de las tres tablas más populares de acuerdo a escritos originales de los primeros siglos de la era cristiana.

Por último nos encontramos las *paipo*, construidas a base de *koa*, de menos de dos metros de largo, 40 centímetros de ancho y tan solo unos 15 milímetros de espesor. Diseñadas para montarse tumbado, estas tablas son las precursoras de los actuales *bodyboards*



Figura 1.2 Recreación moderna de una *Paipo*.

A la hora de elegir el tipo de madera, a falta de pruebas más avanzadas, los *kahuna* observaban la presencia o no de gusanos en los árboles para discernir cuales de éstos eran los menos porosos y, por tanto, los más adecuados para la fabricación de las tablas. Los árboles elegidos eran bendecidos en ceremonias antes de ser

derribados. Tras recortarlos a la medida deseada, los troncos eran trasladados cerca del mar, donde se dejaban hasta un año para el correcto secado de la madera. Una vez conseguido ésto, los especialistas la trabajaban con trozos de coral dentado, piedras volcánicas e incluso con piel de tiburón para mejorar su acabado.

Por último, se trabajaba la impermeabilidad de la tabla, que podía llegar a absorber grandes cantidades de agua si no era tratada. Uno de los métodos de sellado de las tablas comenzaba con la quema de las nueces del árbol *kukui*. A continuación se machacaban algunas hojas del mismo árbol para crear un líquido que, al mezclarse con las cenizas creaba una pasta oscura y espesa que era aplicada en finas capas sobre la madera, consiguiendo una superficie protectora y brillante.

A pesar de que, en la actualidad la madera ha sido sustituida por materiales compuestos y las modernas máquinas de control numérico han reemplazado a los antiguos artilugios de trabajo, la esencia de la fabricación y la forma de las tablas hawaianas fue preservada durante más de mil años. Y no fue hasta principios del siglo XX cuando éstas alcanzaron las costas continentales de los Estados Unidos y Australia.

1.1.2 1900-1940: La Expansión

En los primeros años del siglo XX, la fabricación y producción de tablas no sufrió un gran cambio en lo que a metodología se refiere. Si bien, el deporte llegó a las costas californianas desde Los Ángeles hasta San Diego y al famoso distrito de Coolangatta (Australia) de la mano de personalidades del surf como el medallista olímpico Duke Kahanamoku o el inventor Tom Blake.

Por aquel entonces, la producción de estas tablas se realizaba a pequeña escala en entornos de amigos y conocidos, bajo la filosofía *DIY* o "hazlo tú mismo". A medida que las reservas de *koa*, *ulu* y *wili-wili* desaparecían, los fabricantes se vieron obligados a importar distintos tipos de maderas tales como balsa o sequoia desde Estados Unidos y Sudamérica. Por otro lado, los aficionados americanos y australianos comenzaron a usar maderas tales como el cedro y la caoba en sus diseños.

El primer paso hacia lo que se podría llamar el comienzo de la industrialización del surf ocurrió en 1931. En este año, Blake patentó un diseño de tabla de núcleo hueco [3] fabricada a partir de un esqueleto de largueros y costillas cubierto por finas láminas de madera de balsa, las cuales quedaban aseguradas mediante tornillos de latón alrededor del núcleo.



Figura 1.3 Esqueleto interno de la invención de Tom Blake.

Fue también Blake quien introdujo en 1935 el primer diseño de quilla, mejorando de forma significativa la maniobrabilidad de las tablas del momento. Además, algunos fabricantes comenzaron a construir sus tablas alternando varias láminas de madera en lugar de hacerlas a partir de un bloque sólido.

Sin embargo, en la época de la gran depresión, el precio de las tablas fabricadas comercialmente superaba los 30\$ frente a los 8\$ requeridos para adquirir los materiales necesarios para fabricarla por cuenta propia. Ésto limitó la adquisición de los modelos comerciales a clubs de salvamento donde se empleaban en labores de rescate.

1.1.3 1940-1960: La aparición del foam

En esta época, películas como *Big Wednesday* o *The Endless Summer* junto con la creciente popularidad de la cultura del surf, impulsaron su auge en el Pacífico. Tiendas especializadas en la fabricación de tablas comenzaron a surgir a la vez que inventores como el ingeniero Bob Simmons dotaron por primera vez a la industria del surf de un enfoque más científico.

De la mano de Joe Quigg y Matt Kivlin, antiguos compañeros de Simmons, surgió también en esta época el que probablemente es el modelo de tabla más icónico de la historia del surf, el Malibú. Una tabla de unos tres metros de longitud, poco espesor y cola en punta o *pintail* (figura 1.4).



Figura 1.4 Tablas Malibú.

Para este modelo, Quigg y Kivlin buscaron la madera de balsa más ligera que pudieron encontrar con el fin de conseguir una tabla que supliera la demanda de maniobrabilidad que comenzaba a germinar desde el archipiélago hawaiano. Aunque este modelo fue inicialmente ideado para surfistas femeninas, no tardó en conquistar el mercado del Pacífico gracias a su bajo peso (unos 10 kilos) y su capacidad de giro.

Acorde con la experimentación en diseño, los fabricantes comenzaron a probar diferentes materiales en sus modelos. A finales de la primera mitad del siglo pasado, las reservas de madera de balsa se redujeron drásticamente. La gran mayoría de este tipo de madera se producía comercialmente en Ecuador, donde la lluvia y el clima tropical propiciaban su crecimiento. Más adelante, a principios de la década de los cincuenta, las compañías aeronáuticas Boeing y Lockheed comenzaron a usar madera para el acondicionamiento interior de las cabinas. Como era de esperar, éstas empresas demandaban la más ligera y de mayor calidad, dejando a los fabricantes de tablas sin madera suficiente para cubrir la creciente demanda del mercado.

En ésta época, comenzó a extenderse el uso experimental de un nuevo material polimérico en la fabricación de tablas. El anteriormente mencionado, Bob Simmons, fue el primero que probó la utilización de poliestireno en 1947. Sin embargo, este material tenía grandes desventajas. Cuando el poliestireno entraba en contacto con la resina de poliéster, éste comenzaba a derretirse. Los intentos por proteger la espuma con láminas de madera también resultaron infructuosos, ya que cuando estas tablas se dejaban expuestas al sol, el pegamento usado para unir la espuma con la madera se despegaba causando que muchas tablas simplemente se deshicieran en la playa.

Más adelante, Hobart Alter junto con el ingeniero químico Gordon Clark desarrollaron un método para moldear espuma de poliuretano con la forma necesaria para la fabricación de tablas de surf. Esta espuma constaba de una estructura densa y que no se corrompía al combinarlo con la fibra y la resina. De esta forma, los fabricantes contaban ahora con un material de fácil conformado con el que se impulsó considerablemente la experimentación de nuevos diseños.

1.1.4 1960- : La revolución del Pacífico

Desde su aparición, la espuma reemplazó rápidamente a la madera como material principal para las tablas. A mediados de la década de los sesenta, las tablas de espuma habían sustituido virtualmente a las de madera en todas las costas del Pacífico. A esta evolución, se le sumó la llamada *shortboard revolution*, la cual, motivada

por una búsqueda de mayor radicalidad en los giros, promovió un rápido acortamiento en los diseños de las tablas, asemejándolos finalmente a los utilizados actualmente por la mayoría de fabricantes. En concreto el modelo “*MR twinfin*” desarrollado por Mark Richards en colaboración con otros fabricantes a finales de la década de los setenta le ayudó a ganar cuatro títulos mundiales consecutivos entre los años 1979 y 1982 y sigue siendo hoy en día comercializado con tan solo pequeñas modificaciones.



Figura 1.5 MR twinfin surfboard.

En la figura 1.5 podemos observar a Richards junto a tres de sus modelos de dos quillas.

Por último, cabe destacar el diseño del australiano Simon Anderson, el “*Thruster*”, un modelo de tabla con dos quillas laterales y una central que sigue siendo hoy en día el tipo de montaje de quillas más usado con gran diferencia. [8]

Hoy en día las tablas se fabrican mediante un proceso que consta de dos pasos básicos: El *shape* y el laminado.

El *shape* involucra el conformado y mecanizado del núcleo de espuma. El conformado se realiza mediante la unión de dos cuerpos laterales normalmente de espuma de poliuretano o poliestireno expandido a una lámina central de madera contrachapada llamada **stringer** o “alma”. El mecanizado puede realizarse a mano o bien se utilizan técnicas de control numérico especializadas (figura 1.6).



Figura 1.6 Mecanizado mediante CNC.

Por otro lado, para el laminado se emplean tejidos de fibra de vidrio junto con resina de poliéster o epoxi para crear una capa resistente e impermeable a lo largo de la superficie del núcleo de espuma. Para ello se

utilizan dos capas de tejido por la parte superior o *deck* y una por la parte inferior o *bottom*. El proceso de laminado utilizado en la actualidad se detalla en el capítulo 4.

Tras siglos de evolución, en la industria del surf está germinando en los últimos años una tendencia lenta pero firme de acercamiento a las nuevas tecnologías, implementando, por ejemplo en muchos casos técnicas de control numérico a algunas fases de la fabricación de la tabla, o incorporando materiales de última generación en el diseño de la misma en otros. El objetivo de este trabajo es recopilar los avances que se han dado en los últimos años e intentar realizar algún aporte a la aún inmadura y fértil nueva etapa que se presenta en esta industria desde un enfoque ingenieril.

1.2 Impacto relativo

En esta sección estudiaremos el impacto relativo que pueden tener en la actuación de la tabla el aumento o la reducción de los siguientes factores, a saber: el peso, la rigidez longitudinal, la rigidez torsional y la modificación de las condiciones hidrodinámicas.

1.2.1 Impacto relativo de la modificación de condiciones hidrodinámicas

Cuando se habla de resistencia en términos hidrodinámicos, ésta suele ser un parámetro a minimizar, este hecho es también aplicable en el surf, con alguna salvedad. Para empezar debemos distinguir entre dos modos distintos de resistencia hidrodinámica. Primero, existe la resistencia que ralentiza en la ola, llamada *drag* y en contraposición, existe otra componente de la misma que es, por lo general beneficiosa y buscada tanto por fabricantes como por surfistas a la hora de elegir equipo llamada agarre.

El agarre tiende a mantener la tabla en su avance según la dirección longitudinal de la misma y permite proyectar la fuerza del giro en la ola tanto a la hora de ganar velocidad como a la hora de realizar giros cerrados. Casi la totalidad de este agarre se consigue mediante la optimización de la forma de las quillas y de los cantos de la tabla que estarán inmersos en el fluido.

El *drag* sin embargo es un factor a reducir en cualquier caso, ya que produce pérdidas al conferir parte de la energía cinética de la tabla al fluido, donde se disipará, resultando en una pérdida global de la velocidad. A niveles altos de actuación, este parámetro es muy importante. Tanto que algunos surfistas profesionales, como el campeón del mundo de 2017 John John Florence, exigen tener las marcas de sus patrocinadores pegadas a sus tablas por debajo del laminado para reducir así el *drag* que estas producirían.

Se puede entonces distinguir entre:

- *Drag* - Factor indeseable a reducir derivado de la resistencia de fricción entre el fluido y el móvil.
- Agarre - Aspecto deseado en la mayoría de situaciones para mejorar el control de la tabla.

Sin embargo, no se han llevado a cabo estudios que busquen la reducción de la resistencia de fricción a excepción de alguna investigación acerca de superficies biomiméticas que se detallarán en el capítulo 3.

1.2.2 Impacto relativo del peso en la tabla

En términos de peso, el impacto que puede llegar a tener en la actuación de la tabla se reduce a una cuestión de eficiencia de la flotabilidad y de inercia de la misma. Para este apartado, se tomará como objeto de estudio una *performance board* o tabla de alta gama de un volumen fijo.

En lo que concierne a la flotabilidad para una tabla de volumen fijo, a mayor peso, menor será esta. Lo que se traduce en que el volumen que la tabla podrá mantener a flote será menor ocasionando un mayor *drag* con el fluido en cuestión, tanto en la remada como en la maniobra. Se puede afirmar en este caso que un mayor peso conlleva una ineficiencia en términos de flotabilidad.

En lo referente al impacto que el peso tiene en la inercia de la tabla, es automático razonar que un menor peso se traduce en una menor inercia. Lo que a su vez implica que la tabla demandará menos fuerza a la hora de cambios de dirección en maniobras de giros radicales.

Se puede concluir por tanto que a la hora de la fabricación de la tabla interesa reducir el peso de la misma al máximo.

1.2.3 Impacto relativo de la rigidez longitudinal en la tabla

En lo referente a la rigidez longitudinal debe existir un equilibrio que permita a la tabla mantener su integridad estructural sin grandes deformaciones pero manteniendo un cierto grado de flexibilidad.

La flexibilidad en una tabla permite, bajo los pies de un usuario avanzado, que ésta se comporte como un acumulador de energía durante transiciones entre maniobras de giro, permitiendo proyectar mayor velocidad y control a la salida de las mismas.

Por tanto se trata de llegar a una solución de compromiso entre una flexibilidad moderada y una deformabilidad que no comprometa ninguno de los componentes estructurales de la tabla.

1.2.4 Impacto relativo de la rigidez torsional en la tabla

Aunque en el apartado anterior se comentó que un cierto grado de flexibilidad longitudinal puede mejorar la actuación de la tabla, en el caso de la rigidez torsional, interesa que sea lo mas alta posible.

Se plantea una maniobra de *bottom turn* en la que el *rail* o lateral del lado del giro está prácticamente inmerso por completo en el fluido como podemos ver en la figura 1.7. Si la tabla presentara demasiada flexibilidad torsional, la energía acumulada durante la deformación elástica no se proyectaría en la ola sino que se perdería una vez llegado al labio de la misma ya que, para mayor puntuación en campeonatos, interesa que el *rail* sobresalga por encima del labio de la ola. Esta energía por tanto se habría disipado, resultando en una pérdida de velocidad.



Figura 1.7 Bottom turn.

Además, un exceso de flexibilidad torsional implicaría lentitud de respuesta en las maniobras. Por estas razones podemos concluir que es recomendable mantener un alto grado de rigidez torsional.

2 Patentes

En esta sección nos centraremos en las patentes encontradas al respecto de los puntos anteriores.

2.1 Modificación de las condiciones hidrodinámicas

La mayoría de las patentes disponibles al respecto enfocan la reducción del *drag* mediante la modificación de la forma quillas ya bien para reducir su resistencia o para aumentar la sustentación que producen. También se encuentran otra serie de sistemas que se introducirán a continuación.

- En este sentido se encuentra primero la invención de Douglas James Simpson [6] quién propone un diseño alternativo para la el set de quillas. Éstas incorporan aletas laterales que buscan un aumento de la sustentación para reducir así el *skin drag* global de la tabla.

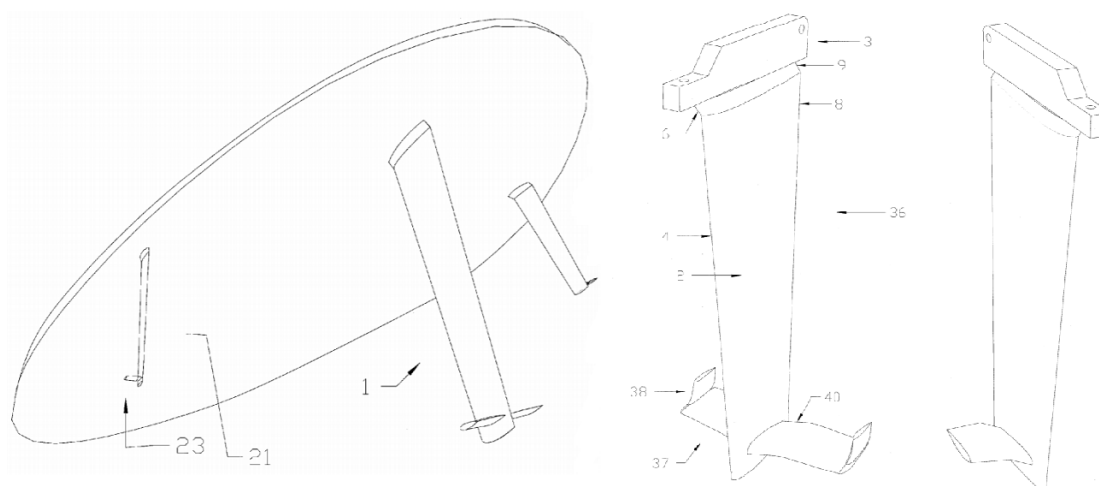


Figura 2.1 Montura del set de quillas y detalle de quillas central y lateral.

En la figura 2.1 se observan las aletas laterales de las quillas. En este caso, el inventor decidió optar por perfiles NACA 0010 y 0012 para su diseño. En el caso de la quilla central, se incluyen los llamados *winglets* en los bordes de aleta con el fin de reducir la resistencia inducida que causarían dichos perfiles.

- En otra patente similar, Steven M. Lee [18], propone una serie de montajes en los que las quillas en lugar de estar en la parte inferior de la tabla a la altura de la cola, están repartidas a lo largo del contorno de la tabla, reduciendo, según afirma su inventor, la resistencia global de la tabla mediante el incremento de la sustentación de la misma.

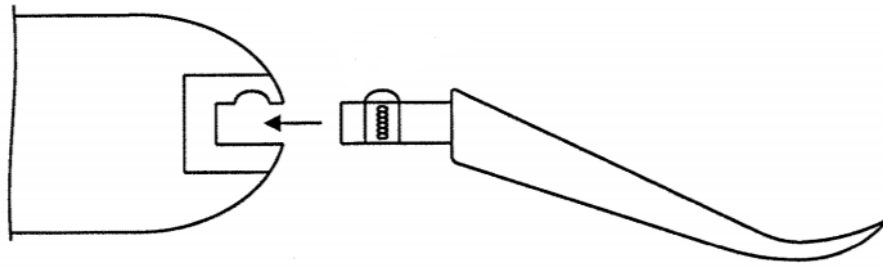


Figura 2.2 Montura de la quilla en el lateral de la tabla.

En la figura 2.3 se observa el razonamiento hidrodinámico que el inventor da a su patente.

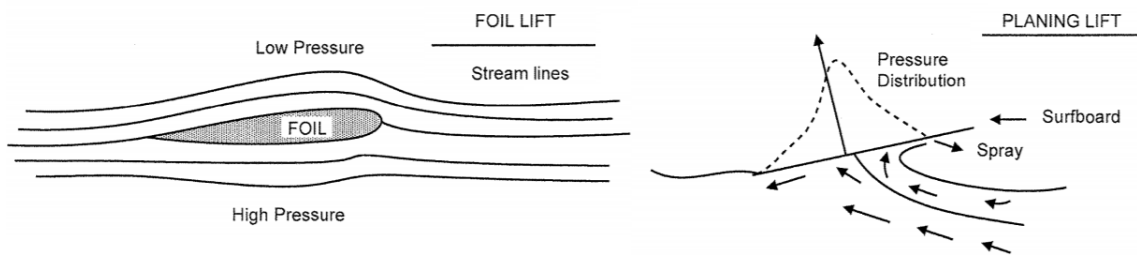


Figura 2.3 Líneas de corriente entorno a la quilla y la tabla.

Sin embargo, la mejora que esta invención pueda conllevar en la reducción del *drag* es con creces ensombrecida por la reducción de la maniobrabilidad que aparentemente esta configuración induciría. Sin embargo, se ha añadido a este informe al tratarse de una solución que se sale de los estándares de actuación en este terreno.

- Cabe destacar también la invención de Dale C. Carson [4] quien propone añadir un sistema de soplado de fluido en la parte inferior de la tabla que estará en contacto con el fluido.

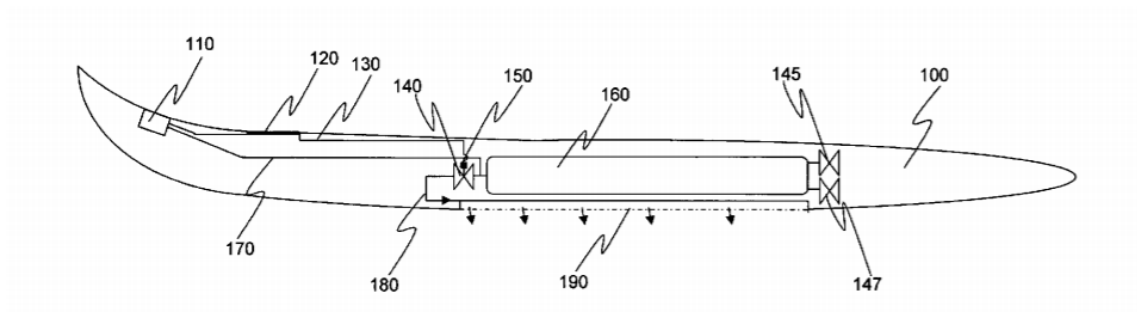


Figura 2.4 Sección transversal de la tabla con el sistema de soplado.

No se entrará en detalle acerca del funcionamiento de este sistema dado que tiene poca aplicabilidad en el entorno de nuestro estudio.

- Por último, se hace mención a la patente de Robert Morgan, Gotz Vollweiler y Klaus Vissing [14] quienes diseñaron una configuración superficial microscópica especialmente hidrofóbica y que puede

tener aplicación en este campo. La superficie en cuestión posee salientes y hendiduras caracterizados por no tener más de $5\mu\text{m}$ de separación entre ellas. Además, al menos el material de los salientes ha de ser hidrofóbico, esto produce un comportamiento macroscópico de bajo coeficiente de rozamiento que puede aplicarse a tablas de surf.

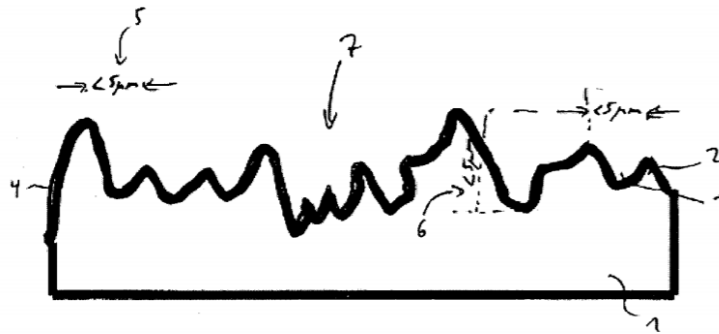


Figura 2.5 Esquema de la superficie a nivel microscópico.

Sin embargo, no se añaden en la patente resultados de cálculo numérico que respalden esta invención. Cabe destacar la posible relación que esta patente pueda tener con los estudios realizados en relación a superficies biomiméticas que se detallarán en el capítulo 3

2.2 Reducción de peso

Esta sección se centra en las patentes que busquen una reducción de peso en la tabla.

- En su invención, Yoshihiro Watanabe [20] propone la fabricación de tablas de surf mediante la sustitución de el foam interno típico por una estructura de larguerillos y cuadernas que mantengan la forma de la tabla. Además de esto, Watanabe propone llenar el volumen interno que ha quedado vacío de helio o nitrógeno con el fin de reducir la densidad total de la tabla.

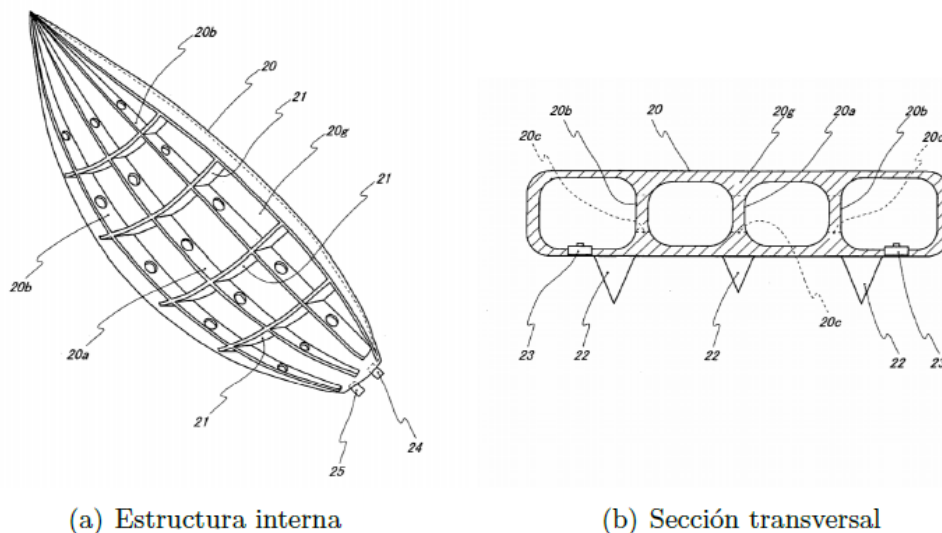
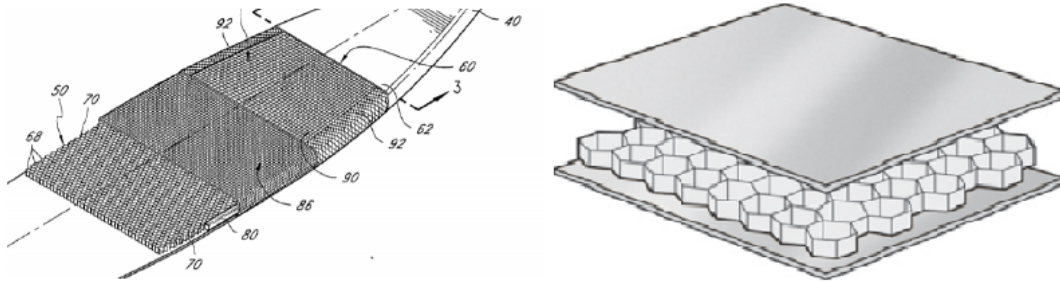


Figura 2.6 Estructura propuesta por Watanabe.

Donde **20i** y **21** denotan las paredes de partición y la carcasa externa, **22** las quillas y **23**, **24** y **25** son válvulas de alivio de presión.

- En la siguiente patente, Edison S. Conner JR. [7] propone fabricar el núcleo de la tabla o *core* en inglés a partir de aluminio con configuración de panel de abeja.

Para ello propone una serie de configuraciones de fabricación de las que solo se detallará una a modo de ejemplo.



(a) Configuración propuesta por el inventor. (b) Aluminio en configuración de panel de abeja.

Figura 2.7 Aplicación de panel de abeja en la tabla.

En la figura 2.7 se puede observar cómo la tabla está compuesta por un núcleo de panel de abeja hexagonal de aluminio **50** recubierto por dos capas de fibra de vidrio **86** y una piel exterior también de material compuesto pre-formado mediante técnicas de VARTM (*Vacuum assisted resin transfer molding*) con el objetivo de reducir su contenido en resina. El espacio que queda entre el núcleo y el rail se rellena con poliuretano con el fin de amoldarse a la forma del mismo **80**.

2.3 Rigidez longitudinal

Se procede a continuación a relacionar las patentes que buscan optimizar la flexibilidad de la tabla de acuerdo con lo que se comentó en la sección 1.2.

- En la búsqueda de la mejora del comportamiento elástico de la tabla y con la intención añadida de mejorar la resistencia a abolladuras de la superficie superior de la tabla o *deck*, Michael D. McDonald y Stanley A. Pleskunas [12] propusieron una tabla formada a partir de la unión de dos sub-cuerpos unidos.

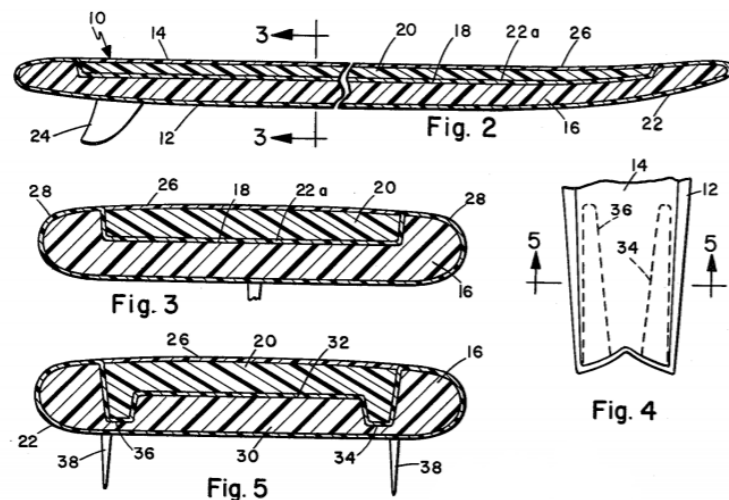


Figura 2.8 Secciones longitudinal y transversal.

La tabla se compone por un cuerpo inferior **16** o *bottom* de un material relativamente rígido como por ejemplo espuma de poliuretano y conformado de acuerdo con la forma deseada dejando un volumen libre **20** en la zona del *deck*. Posteriormente se procederá a un proceso de laminado común con, por ejemplo fibra de vidrio y resina de poliéster. A continuación, la cavidad superior se rellena de un material flexible como por ejemplo espuma de polietileno que amortigüe posibles golpes y que dote a la tabla de una mayor flexibilidad. Por último se procede a cubrir la superficie superior de la tabla con un material vinílico **26** que aporte impermeabilidad. En la figura 2.8 (Fig. 4 y 5) vemos la misma esencia transportada, en este caso a una tabla con cola de pez y dos quillas usualmente denominada *twin fin* en la que se han añadido dos surcos **34** y **36** que modificarán la flexibilidad de la cola de la tabla.

- Se procede a continuación a comentar la invención de uno de los gigantes de la industria del surf que más está triunfando comercialmente en los últimos años. En su patente, Hayden Charles Cox [5], fundador de Hayden Shapes, explica su *parabolic carbon rail*.

Esta técnica viene a sustituir a los clásicos diseños con alma de madera o *stringer* por otros en los que la integridad estructural se consigue por medio de la incorporación de fibra de carbono a lo largo de los laterales de la tabla **14** como se muestra en la figura 2.9.

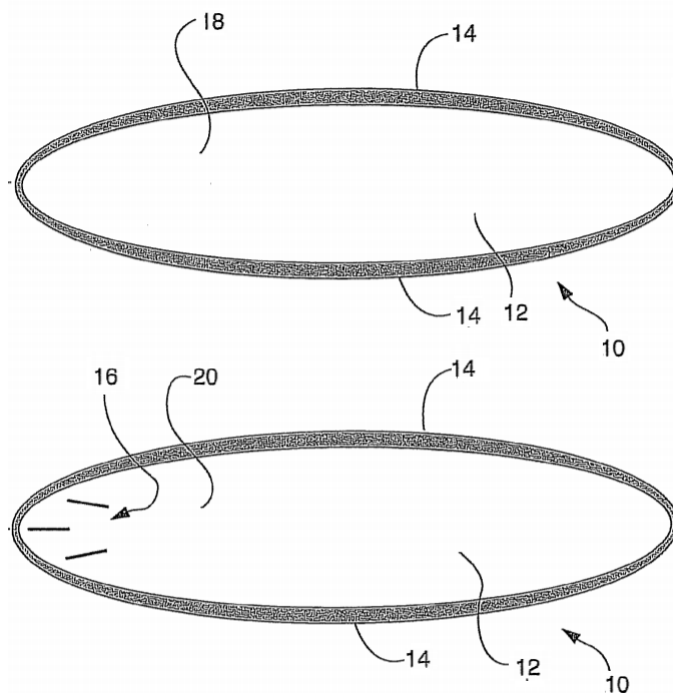


Figura 2.9 Parabolic carbon rails.

Esta técnica permite, por tanto, prescindir del *stringer* con el consiguiente ahorro de peso. Además, esta configuración dota a la tabla de una flexibilidad mejorada y por tanto de una mejor respuesta en la ola.

- En contraposición de los *rails* parabólicos, la invención de Dane Ashley Hantz [2], propone como rigidizador una serie de surcos tallados sobre la superficie superior de la tabla y reforzados por un laminado de fibras de carbono o kevlar con resina epoxy.

Como se puede observar en la figura 2.10, los surcos se extienden desde la cola **14** hasta la punta de la tabla **12** siguiendo la forma que marcan los contornos de la tabla **16** y uniéndose en los puntos **31**, **33**, **41** y **43**. Esta configuración permite varios set de surcos, ya bien solo en los laterales (como se muestra en la figura 2.10) o bien añadiendo un tercer set de surcos central si se desea una mayor rigidez.

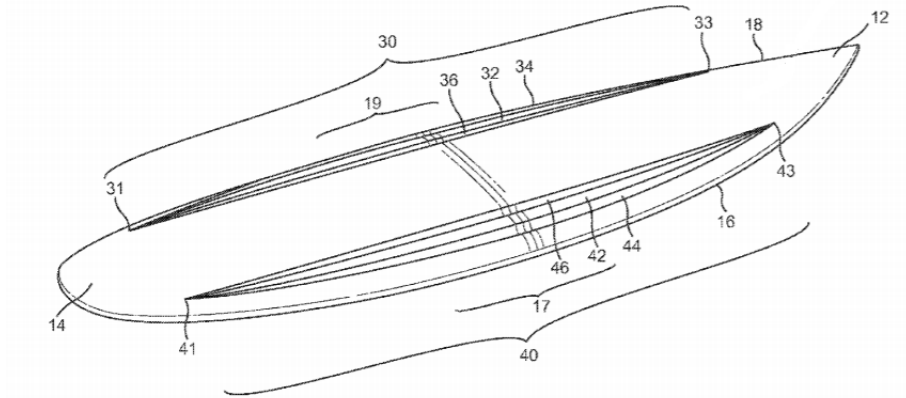


Figura 2.10 Propuesta de Dane A. Hantz.

En este caso se ha optado por una configuración con dos sets de surcos laterales con dos surcos cada uno. Como se aprecia en la figura 2.11, tanto los surcos (**44, 46**) como el espacio entre ellos **42** se ha laminado con fibras resistentes **50** como, por ejemplo de carbono o de kevlar.

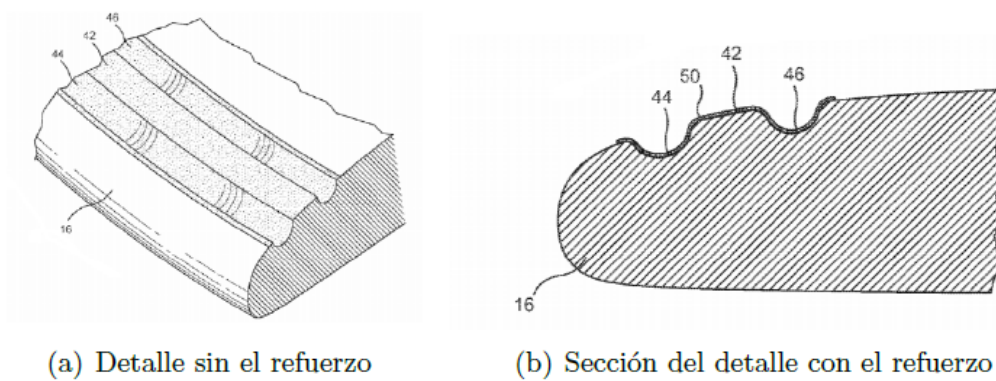


Figura 2.11 Detalle de los surcos.

- Por último, cabe destacar la invención de Robert C. Tinkler y Michael R. Tinkler [19] quien propone que para obtener una flexibilidad óptima en la tabla, habría que separar la cola del resto de la tabla y enlazar ambas mecánicamente mediante resortes de rigidez variable.

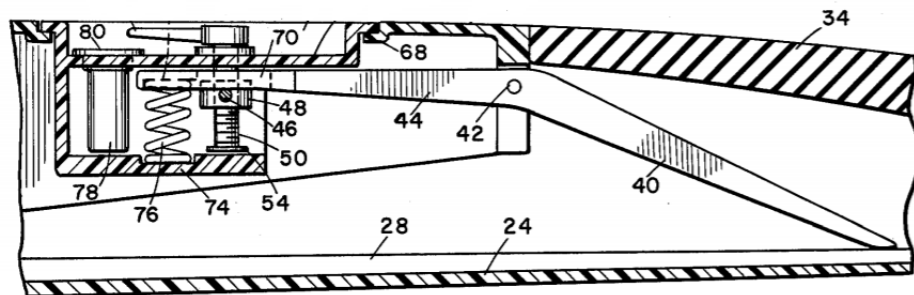


Figura 2.12 Sección de la unión entre ambas partes.

La figura 2.12 muestra la unión que se haría entre la parte anterior de la tabla (zona de la cola) y la parte posterior de la misma.

2.4 Rigidez torsional

Con el objeto de aumentar la rigidez torsional de la tabla y manteniendo cierto grado de flexibilidad longitudinal, Daniel P. Macdonald [16] propone la utilización de bandas de fibra de carbono o similar de unos 90mm de ancho, dispuestas en la tabla de forma que rodeen los cantos de la tabla en la zona superior de la cola y luego rodeen los cantos a aproximadamente un cuarto de la longitud de la tabla para extenderse por la parte inferior de la tabla hasta las puntas. Tal y como se ejemplifica en la figura 2.13.

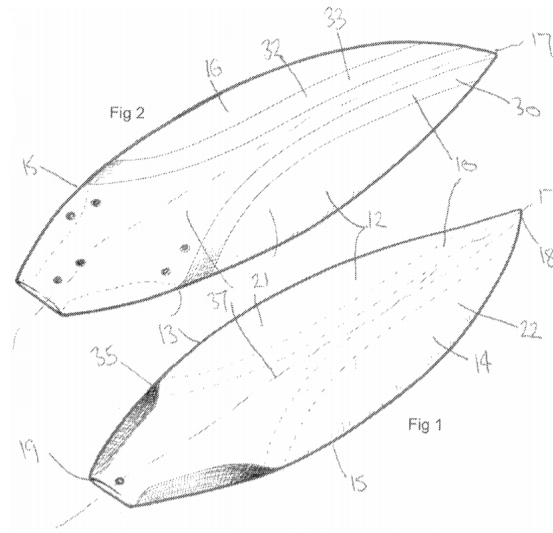


Figura 2.13 Disposición de los refuerzos.

Además de los beneficios ya mencionados, el refuerzo en la zona de la cola dotará a ésta de una mayor resistencia y dureza, evitando así posibles abolladuras en los cantos, ya que esta zona sufre las mayores presiones de toda la tabla durante el uso normal de la misma.

3 Artículos

Este apartado se centra en las investigaciones que se han llevado a cabo en los últimos años en relación a la industria del surf.

3.1 Medio ambientales

La mayoría de estas investigaciones están enfocadas a la reducción de la huella ecológica que causa esta industria tanto en la fabricación de las tablas como en su posterior proceso de desechado una vez quedan obsoletas.

- “Flexural testing of sustainable and alternative materials” [11]

En este estudio, Jamie M. Johnstone puso a prueba una serie de materiales de origen total o parcialmente natural con el objeto de comprobar si son una alternativa viable y sostenible de los materiales actualmente utilizados en la construcción de tablas de surf.

Como método de testeo se eligió un ensayo de flexión de tres puntos. Los materiales sometidos a prueba fueron resina epoxy, *Bio-foam*, y dos tipos diferentes de fibra de cáñamo, frente a los métodos tradicionales de espuma de poliuretano y resina de poliéster con fibra de vidrio. Las medidas de las probetas fueron $l=240\text{mm}$, $w=50\text{mm}$, $d=10.3\text{-}11.6\text{mm}$. Para cada material se tomaron cuatro muestras y se tomó la media de todas para la comparación. Los resultados fueron los siguientes.

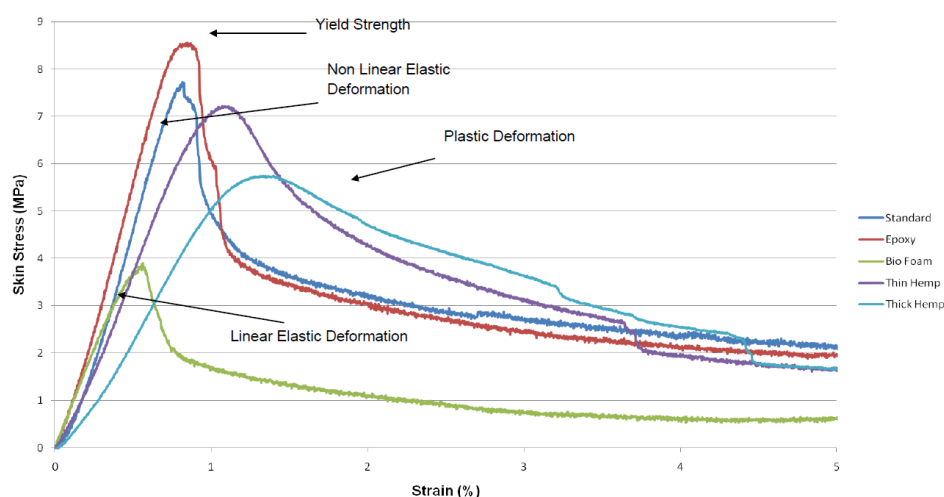


Figura 3.1 Comparación en el ensayo.

Los resultados mostraron un comportamiento con menor rigidez y menor límite elástico para todos los materiales salvo para la resina epoxy. Puede concluirse, por tanto, que a pesar de que la resina epoxy

no presenta ningún beneficio medioambiental sobre el poliéster, su mayor durabilidad lo convierte en una alternativa algo más ecológica frente a los materiales usados actualmente.

- **“Eco-friendly Flax Fibre/Epoxy Resin/Composite System for Surfboard Production” [9]**

El objeto de este estudio es la prueba de un laminado de lino con eco-epoxy como alternativa a los sistemas de alto rendimiento actuales de fibra de vidrio S con resina de poliéster.

Según los autores, los tres principales problemas de los métodos ecológicos actuales son tres. Primero, las propiedades mecánicas de los materiales sostenibles no es comparable a aquellas obtenidas de fibras y resinas de base petroquímica. Segundo, los métodos de obtención de estos materiales sostenibles no están demasiado extendidos, por lo que el precio de los mismos aumenta, repercutiendo en una subida del producto final. Por último, la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales combinada con las hidrofobia propia de las resinas orgánicas no produce una buena compatibilidad, creando intercaras débiles y empeorando globalmente la actuación a largo plazo del producto.

Los actuales productos sostenibles se basan en resinas bio-epoxy y fibras de lino natural en su mayoría llegando a alcanzar precios del orden de dos o tres veces el de los productos tradicionales. Por otro lado, los sistemas de fabricación que realmente se utilizan actualmente no permiten su posterior reutilización por lo que una vez terminada su vida útil, su reciclabilidad es un grave problema. Es por esto que los autores, en colaboración con la empresa 5'TX surfboards en Euskadi han realizado este estudio con el fin de obtener un producto sostenible a un precio que no supere el 150 % del precio de una tabla convencional.

En el estudio se compararon dos tablas con idéntico núcleo. Una de ellas laminada con fibra de lino (*FlaxPly UD150 by Lineo*) y resina ecológica (*Super-Sap CLR/CLS epoxy system by Entropy resins Inc*). La otra con fibra de vidrio (*S-glass fiber woven BX125 0°/90° by Hexcel*) y resina de poliéster (*SIL66BQ-250A by Silmar*). En un primer momento la tabla fabricada con productos sostenibles no alcanzó las propiedades mecánicas esperadas, por lo que se decidió añadir una capa extra de fibra al laminado que suplió esta deficiencia. Sin embargo, la cantidad extra de resina y la mayor dificultad de mojado de la fibra natural hizo que el peso final del producto superara por un kilo al del modelo convencional (3kg). Por ello se recurrió a un sistema de infusión por vacío aplicado al producto entero tras el laminado que minimizara la cantidad de resina utilizada aumentando así la fracción volumétrica de fibra y asemejando las propiedades del producto sostenible a las del convencional.



Figura 3.2 Previo a la laminación del *deck* y producto terminado (dcha).

Los trabajos futuros se basan en mejorar la compatibilidad hidrofílica del conjunto fibra natural y resina orgánica y en optimizar el proceso de infusión en vacío con el objeto de minimizar el peso de la tabla y reducir el tiempo de fabricación de la misma. Todo ello se prevee que consiga establecer el precio comercial de estos productos por debajo del 150 % del de productos convencionales.

3.2 Impresión 3D

Aunque aún no se haya aplicado a tablas de surf, cabe destacar la investigación que científicos de diversas universidades de Australia llevaron a cabo para conseguir prototipos de quillas para tablas de surf mediante impresiones 3D.

- “Additive Manufacturing, Modeling and Performance Evaluation of 3D Printed Fins for Surfboards” [17]

En un estudio realizado por diversas universidades de Australia, se pusieron a prueba en el mar distintos tipos de quillas comerciales y experimentales fabricadas mediante técnicas de impresión 3D. Para ello se adquirieron datos de la actuación de las quillas mediante un sistema de adquisición de datos (que no se especifica en el artículo) durante las sesiones de varios surfistas aficionados y de un profesional (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Datos obtenidos para los dos sujetos.

	Sujeto 2 - quillas comerciales	Sujeto 2 - quillas por impresión 3D	Sujeto 2 - quillas por impresión 3D	Sujeto 2 - quillas comerciales
Potencia adimensional	5.1 ± 2.6	5.2 ± 2.4	1.7 ± 1.4	5.8 ± 3.2
Velocidad (m/s)	6.1 ± 1.4	5.8 ± 1.1	4.6 ± 1.4	6.8 ± 2.3
Ángulo de guiñada (rad)	2.7 ± 0.6	2.6 ± 0.6	1.9 ± 0.5	3.0 ± 0.3
Duración (s)	1.1 ± 0.4	1.1 ± 0.3	1.4 ± 0.6	1.1 ± 0.1
Velocidad de rotación (rad/s)	2.5 ± 0.6	2.4 ± 0.6	1.4 ± 0.5	2.7 ± 0.5
Ángulo de cabeceo (rad)	1.1 ± 0.4	1.0 ± 0.4	0.9 ± 0.5	1.2 ± 0.5
Ángulo de balance (rad)	0.8 ± 0.3	0.7 ± 0.3	0.6 ± 0.4	0.8 ± 0.3

En la tabla podemos observar que los valores de todas las magnitudes referentes a quillas comerciales y a los prototipos son del mismo orden. Además, la posibilidad de realizar un estudio computacional previo de los diseños propuestos es una gran ventaja que hace muy deseable este tipo de prototipado.

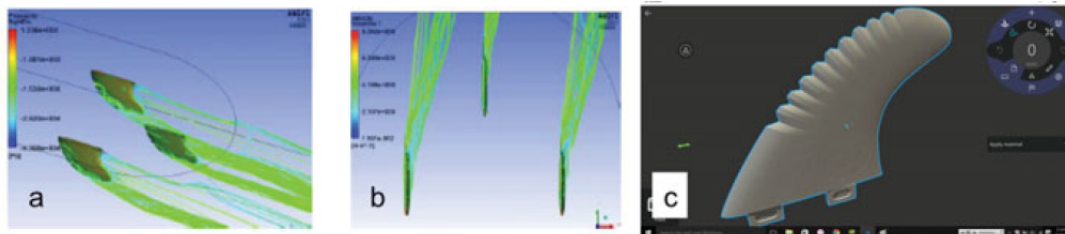


Figura 3.3 a) y b) CFD de las quillas a un ángulo de guiñada de 15°. c) Diseño asistido por ordenador de la quilla.

En la figura 3.3 podemos observar el estudio hidrodinámico de las quillas sin necesidad de fabricarlas.

3.3 Superficies biomiméticas

El estudio de superficies biomiméticas con el fin de reducir la resistencia al avance es un tema candente, sobretudo en países asiáticos. Sin embargo, no parece que una imitación a nivel microscópico para una gran superficie sea viable económicamente por el momento.

En este apartado se relacionan los estudios enfocados a la reducción del coeficiente de resistencia. En concreto, mediante la utilización de superficies biomiméticas que imiten la estructura microscópica de dentículos de la piel de los tiburones.

Diversos estudios demuestran que la piel del tiburón es capaz de controlar la separación de la capa límite. En régimen laminar, la piel del tiburón induce una transición forzada a turbulento con el fin de retrasar lo más posible la separación. Este método puede verse en objetos tan comunes como las pelotas de golf. En régimen turbulento, la piel del tiburón reduce el reflujo causado por la turbulencia manteniendo una microcapa viscosa adherida a la superficie durante más tiempo. [1]

Estas características hacen de la piel del tiburón un objeto interesante para nuestro estudio. A continuación, se proceda a describir dos estudios realizados por universidades malayas y chinas en los que se estudia el comportamiento de dos reproducciones a escala macro y microscópica, respectivamente. El análisis se llevó a cabo mediante técnicas de CFD (*Computational Fluid Mechanics*).

• “The Study of Drag Reduction on Ships Inspired by Simplified Shark Skin Imitation” [10]

En un estudio realizado por la Universidad *Malaysia Sarawak* se probó la reproducción de superficies biomiméticas a nivel macroscópico para su implementación en cascos de barcos con el fin de reducir su resistencia en el seno de un fluido.

En este caso, los dentículos que se pretendieron reproducir fueron los de un *Isurus oxyrinchus* o marrajo como es comúnmente conocido en las costas andaluzas. Este tiburón se caracteriza por ser uno de los peces más rápidos del planeta.

El tamaño de los dentículos de un marrajo es de los menores entre los tiburones siendo de unos $200\mu\text{m}$. Otras especies como el tiburón leopardo poseen dentículos de unos 0.5mm de tamaño.

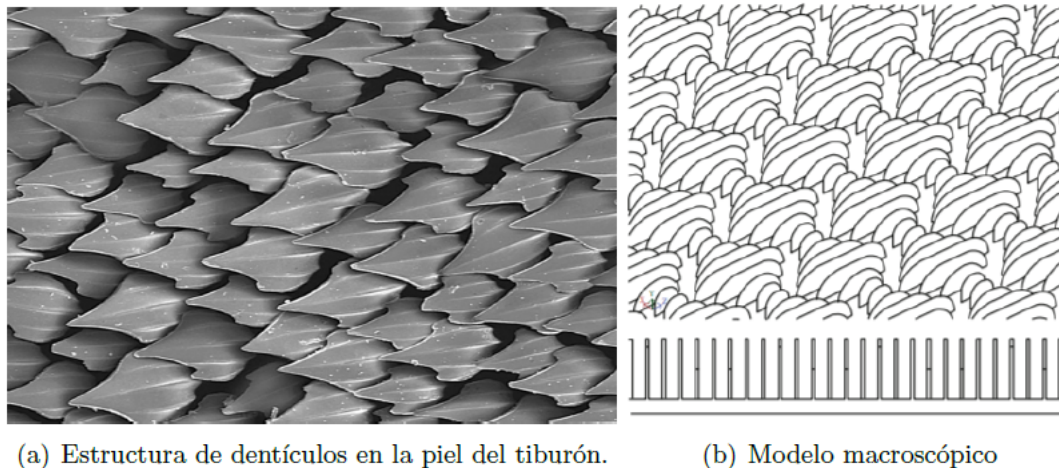


Figura 3.4 Dentículos.

Este estudio, sin embargo no pretende emular la estructura de estas superficies a nivel microscópico sino que proponen un modelo a mayor escala como podemos observar en la figura 3.4. Ésto es debido a que una reproducción a nivel microscópico para una superficie tan grande como la del casco de un barco tendría un coste prácticamente inasumible. Las dimensiones de los dentículos modelados se facilitan en la figura 3.5

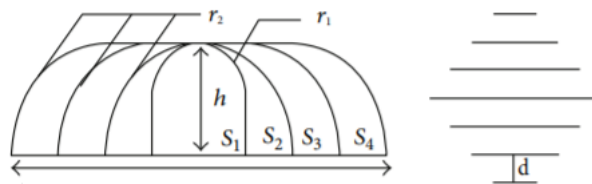


Figura 3.5 Vista lateral y en planta del modelo de dentículo.

Donde $r_1 = 1\text{cm}$, $r_2 = 2\text{cm}$ son los radios de los arcos, $S_1 = 2\text{cm}$, $S_2 = 4\text{cm}$, $S_3 = 6\text{cm}$, $S_4 = 8\text{cm}$ son las longitudes de cada una de las aletas $d = 1\text{cm}$ es la distancia entre aletas y $h = 2\text{cm}$ es la altura de las mismas.

La forma de los pequeños dentículos de los tiburones ayuda a energizar las zonas de flujo más lento alrededor del cuerpo del pez, esto ayuda a mantener alejados de la superficie los vórtices mediante la creación de una microcapa viscosa cerca de la piel.

La condición de no deslizamiento nos dice que la velocidad relativa de cualquier cuerpo inmerso en un fluido y con una determinada velocidad V_c , es cero en la superficie del mismo. A una distancia suficientemente alejada del móvil y tomando éste como referencia, tenemos que la velocidad del fluido es V_c . La fuerza F_D requerida para realizar este transporte de cantidad de movimiento entre el cuerpo y el fluido es lo que conocemos como resistencia de fricción o viscosa y depende proporcionalmente de la derivada de la velocidad longitudinal con respecto a la coordenada perpendicular a la dirección de desplazamiento en la superficie del cuerpo.

$$F_D \propto \frac{\delta V_x}{\delta y} \Big|_{y=0} \cdot \quad (3.1)$$

La peculiar configuración de los dentículos de la piel del marrajo permite un gradiente menos intenso que una superficie simplemente plana, lo que conlleva una reducción del valor de la derivada anterior (ecuación 3.1), y con ello, una reducción de la resistencia total.

Los resultados obtenidos usando la herramienta de CFD *Ansys Fluent* demuestran que esta configuración aplicada a una superficie rectangular genera menos tensiones tangenciales de pared que para la misma superficie plana y por consiguiente, una menor resistencia.

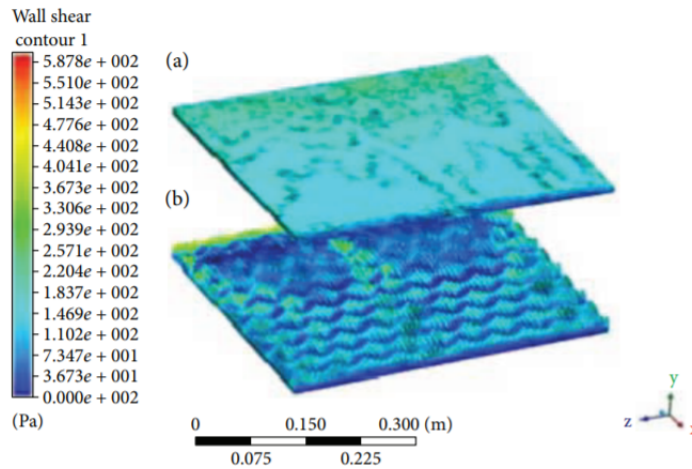


Figura 3.6 Comparación de las dos superficies.

Se calculó que este mismo principio aplicado a todo el casco del barco conseguiría reducir en un 3.75% el coeficiente de resistencia lo que implica una reducción en la resistencia total y por con ello un ahorro de combustible considerable.

- **“The Study of Drag Reduction on Ships Inspired by Simplified Shark Skin Imitation” [21]**

El objeto de este estudio, al contrario que el anterior es el análisis de la superficie de la piel del tiburón a escala microscópica partiendo de una muestra real de tejido.

Para computerizar los detalles de los dentículos con la suficiente exactitud, la muestra de piel fue sometida a una serie de tratamientos de limpieza, fijación química y secado. Una vez realizado el tratamiento de la muestra, el programa fue capaz de modelar la piel con una resolución de 0.1nm.

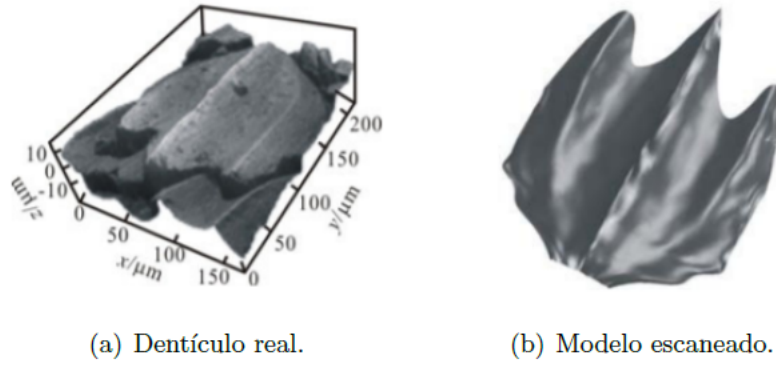


Figura 3.7 Comparación denticulo real y escaneado.

Sin embargo, la gran complejidad de forma de la piel del tiburón crea problemas a la hora de cerrar el dominio, por lo que a la hora de introducir la forma final de la pieza en el programa de CFD se optó por añadirle una serie de simplificaciones. Además, la superficie longitudinal de cada denticulo no está alineada con la dirección del flujo incidente, sino que posee un ángulo de ataque que en este artículo de asume como 15° . En la figura 3.8 podemos ver el modelo continuo y el dominio de aplicación para el programa. El cuál consta de una superficie suave y el modelo realizado, ambas con el mismo área con el propósito de comparar resultados.

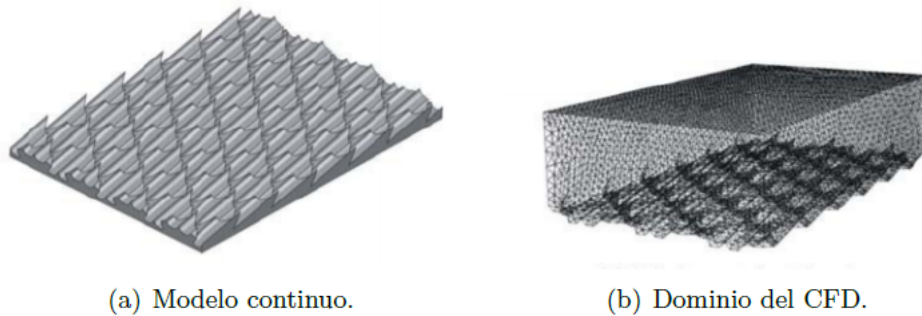


Figura 3.8 Simplificaciones.

Como se comentó al principio del apartado, la estructura de la piel de tiburón consigue mantener una subcapa límite viscosa que prácticamente cubra todo el denticulo con el fin de elevar los vórtices turbulentos y, con ello, reducir el coeficiente de resistencia total. Una forma de cuantificar este efecto es medir la vorticidad en el dominio fluido en contacto con la superficie.

En la figura 3.9 podemos observar la magnitud de la vorticidad sobre el dominio medido en segundos a la menos uno. Cuando la velocidad media alcanza los 5 m/s, tiene lugar la transición a flujo turbulento y la piel de tiburón muestra su mecanismo de reducción de resistencia. Integrando para toda la superficie el campo de vorticidades y procesando los datos, se obtienen las siguientes eficiencias de reducción del *drag* (tabla 3.2).

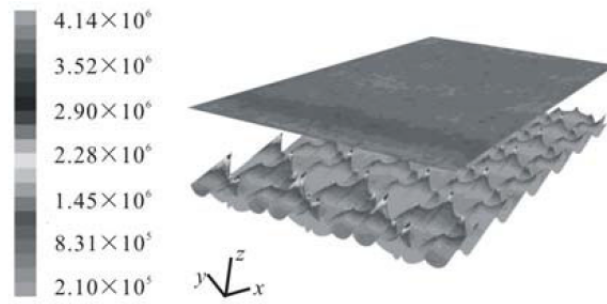


Figura 3.9 Magnitud de la vorticidad en la superficie suave y la piel de tiburón.

Tabla 3.2 Eficiencia frente a velocidad media.

Velocidad me- dia (m/s)	Eficiencia en la reducción de resistencia	Velocidad me- dia (m/s)	Eficiencia en la reducción de resistencia
5.1	7.09 %	5.6	9.36 %
5.2	7.53 %	5.7	10.21 %
5.3	7.69 %	5.8	11.69 %
5.4	8.08 %	5.9	12.53 %
5.5	8.28 %	6.0	13.63 %

4 Investigación

Tras un estudio de las patentes y artículos existentes en las bases de datos y de información, se ha llegado a la conclusión, como se avanzaba en la introducción, de que la base científica que podemos encontrar tras los últimos avances de la industria del surf es bastante pobre.

Por tanto, desde la línea simple que la naturaleza de este trabajo nos impone, esta investigación trata de abrir el camino para futuras mejoras en las aplicaciones tecnológicas en este campo. [15]

4.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es comprobar en qué medida afectaría una ligera mejora tecnológica de los procesos de laminado al rendimiento mecánico posterior del equipo. Se entiende por laminado al proceso de cubrir el núcleo de espuma de la tabla de fibra, ya sea de vidrio o de carbono para dotarla de la resistencia y dureza necesarias. Para ello se compararán las propiedades mecánicas de material compuesto fabricado por el proceso tradicional y las de material compuesto fabricado a partir de un método más sofisticado si bien bastante simple, ya que se busca la aplicabilidad real en el mercado.

El proceso utilizado actualmente en la industria es el llamado *hand lay up* en el que el operario extiende la fibra sobre el molde que se desea (en este caso directamente sobre la tabla) recortándolo según la forma del mismo.



Figura 4.1 Colocación de la fibra en el laminado de tablas.

Como puede observarse en la figura 4.1, para el laminado del *bottom* solo se utilizará una capa de tejido, mientras que para el *deck* se emplean dos capas. Una vez hecho esto, se procede al vertido de la resina directamente sobre la fibra. El extendido se realiza con una espátula de plástico o *squeegee* hasta que la resina comienza a gotear por los bordes (figura (4.2)). Por último, se deja curar y se repite la operación por el lado opuesto.



Figura 4.2 Aplicación de la resina.

El método propuesto, sin embargo, consiste en emplear calor y vacío durante el curado de la pieza que vayamos a fabricar. Para aplicar este proceso en la industria tan solo se precisaría una fuente de calor suave o un horno lo suficientemente largo como para acomodar una tabla (unos dos metros) y un regulador de vacío, ambas inversiones razonables para volúmenes de producción medios.

Para comparar estos dos procesos, se fabricarán una serie de probetas (tres para orientación de las fibras a 0° y tres con orientación $\pm 45^\circ$) para cada tipo de proceso con el fin de medir sus propiedades mecánicas.

4.2 Dimensiones de la probeta

Las probetas que van a fabricarse tendrán, en ambos casos dimensiones idénticas. Para tener una idea aproximada de la geometría de la pieza en cuestión se ha utilizado el programa de modelado CATIA para obtener una representación tridimensional aproximada de la forma de la pieza (figura 4.3).

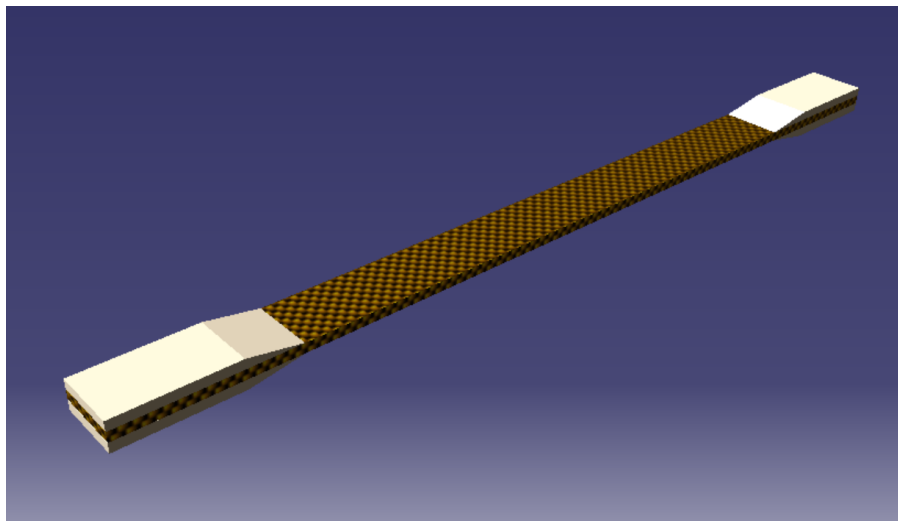


Figura 4.3 Modelado 3D aproximado de la probeta.

En la siguiente imagen se presentan las vistas frontal y en planta de la pieza.

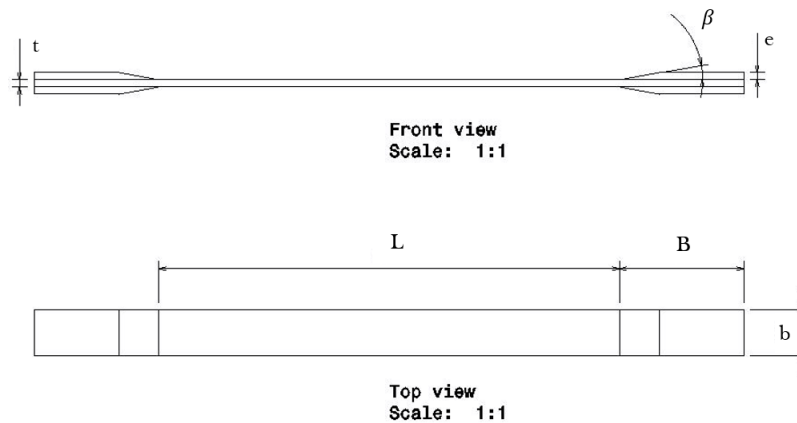


Figura 4.4 Alzado y planta de la probeta.

A continuación se detallan los valores utilizados para la pieza de las figuras 4.3 y 4.4 en el ensayo.

- Probeta con orientación $\pm 45^\circ$

$$b = 20mm$$

$$t = \begin{cases} \sim 0.35mm, & \text{para el laminado en frío} \\ \sim 0.27mm, & \text{para laminado en caliente con vacío} \end{cases}$$

$$L \sim 120mm$$

- Probeta con orientación $0/90^\circ$

$$b = 20mm$$

$$t = \begin{cases} \sim 0.35mm, & \text{para el laminado en frío} \\ \sim 0.27mm, & \text{para laminado en caliente con vacío} \end{cases}$$

$$L \sim 120mm$$

- Refuerzos

$$B = 40mm$$

$$e = 1.5mm$$

$$\beta = 90^\circ.$$

Estas dimensiones se extrajeron de la norma ASTM D-3039 y fueron adaptadas por profesores del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la ETSI (GERM) para ceñirse a los requerimientos del ensayo. Las dimensiones reales fluctuarán en torno a estos valores y se muestran en el apartado 4.4.

4.3 Fabricación

En este apartado se detallan los procesos de fabricación empleados para las distintas probetas que se utilizaron para la caracterización mecánica del material.

Los materiales empleados son:

- Fibra de vidrio

Para realizar una caracterización de este material se realizó un análisis de la densidad de hilos. Para comprobar la igualdad geométrica del tejido en ambas direcciones.

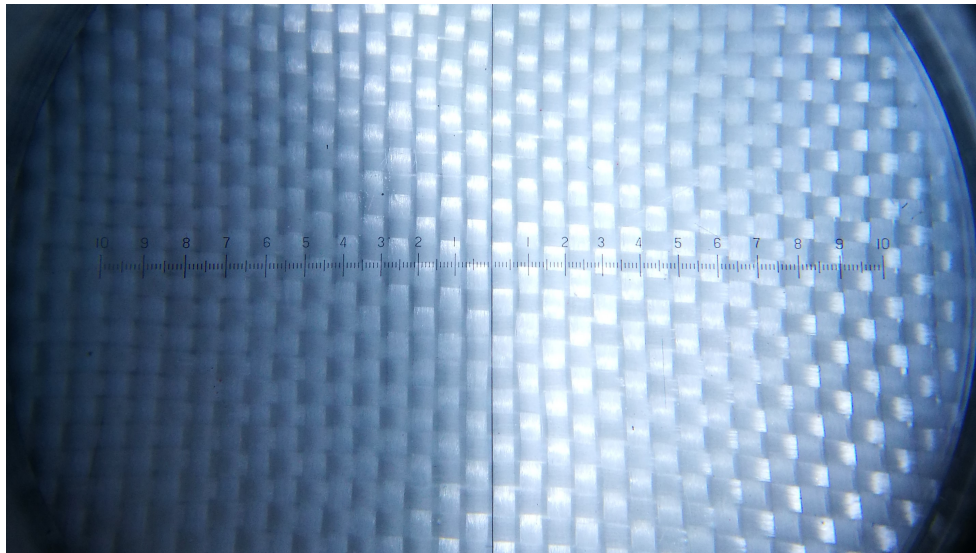


Figura 4.5 Captura del visor del instrumento de medición.

- Resina

Para la fabricación de las probetas se utilizó resina epoxi de dos componentes (parte A y parte B) de la marca Feroqa® y temperatura óptima de curado de $T^{opt} = 60C$.



Figura 4.6 Resina utilizada en el proceso.

Se utilizó también desmoldeador líquido de la misma marca en ambos casos.

4.3.1 Hand lay up

En la fabricación de las probetas *hand lay up*, se ha seguido el siguiente proceso:

1. Mezclado de los componentes de la resina epoxi a razón de 100 partes del componente A por cada 30 partes del componente B. El pesaje de las cantidades de cada componente se realizó con una exactitud de decenas de miligramo.

2. Limpieza y aplicación de desmoldeante líquido sobre el molde aluminio para facilitar su extracción tras el curado.
3. Impregnado de la fibra y aplicación al molde de las dos capas.



Figura 4.7 Fibra impregnada a 0° (izquierda) y a $\pm 45^\circ$ (derecha).

4. Curado de la resina. Dado que se trata de un proceso de *hand lay up*, el curado se realizó a temperatura ambiente durante veinticuatro horas.
5. Desmoldeado de las placas de material compuesto.

4.3.2 Proceso alternativo

Los tres primeros pasos del proceso coinciden en ambos casos, al igual que el último, por lo que sólo se comentarán los pasos intermedios que difieren entre los dos.

1. Ídem que el paso 1 en el proceso *hand lay up*.
2. Ídem que el paso 2 en el proceso *hand lay up*.
3. Ídem que el paso 3 en el proceso *hand lay up*. Entrada en la sala limpia.

4. Aplicación de la lámina desmoldeante superior y del sellado de cromato.

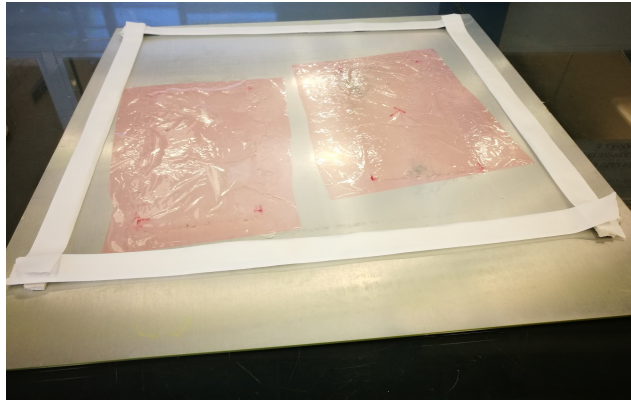


Figura 4.8 Desmoldeante y sellador perimetral de la placa. Fibra impregnada a 0° (izquierda) y a $\pm 45^\circ$ (derecha).

5. Colocación de las bases de las válvulas de vacío y del aireador, tejido muy poroso que promueve una distribución uniforme del vacío a lo largo de toda la superficie.

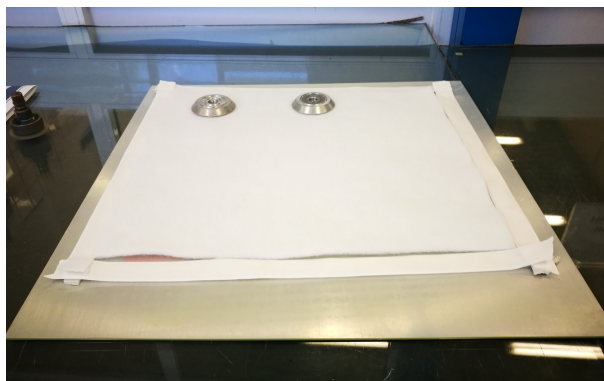


Figura 4.9 Placa con el aireador y las bases de las válvulas colocadas.

6. Colocación de la bolsa y montaje de las válvulas completas. La bolsa ha de sellarse usando la cinta

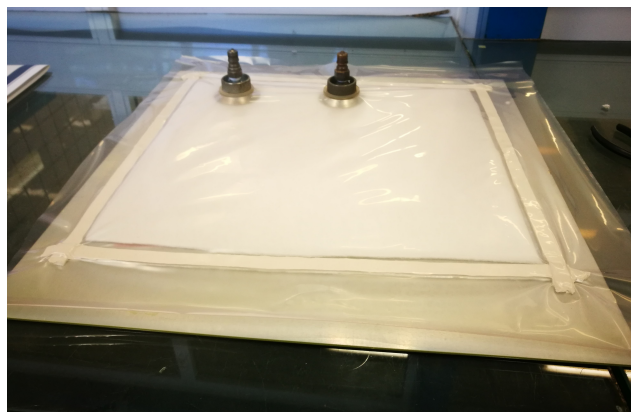


Figura 4.10 Placa con la bolsa sellada en su perímetro y con las válvulas colocadas.

7. Aplicación del vacío.

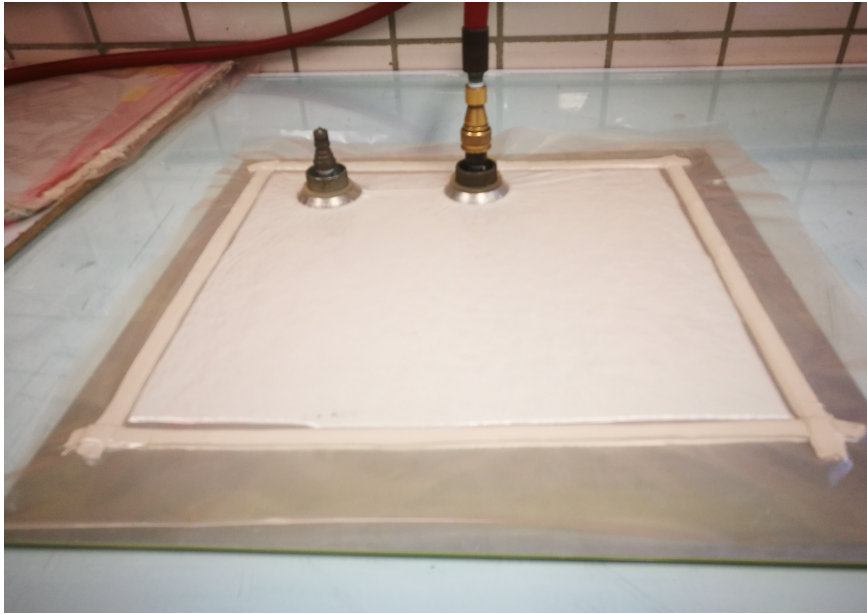


Figura 4.11 Aplicación del vacío.

8. Curado en horno durante una hora y media a 60°C con vacío aplicado.



(a) Colocación de la placa en el horno.

(b) Horno a 60°C.

Figura 4.12 Octavo paso del proceso alternativo.

9. Extracción de la placa del horno.

10. Ídem que el paso 5 en el proceso *hand lay up*.

4.3.3 Refuerzos

Se ha separado este apartado debido a las complicaciones sufridas en este respecto y por recomendación expresa de los técnicos que supervisaron el proceso de fabricación de las probetas para el ensayo.

El pegado de los refuerzos de fibra de vidrio suele realizarse con adhesivo de curado en caliente (120°C). Sin embargo, en este caso la resina utilizada para las probetas no estaba preparada para soportar esas temperaturas, por lo que se optó por el pegado con adhesivo en frío de la marca Pattex®. Cabe destacar que aún siendo un

adhesivo de pegado en frío, una temperatura de hasta 70°C promovía un curado más rápido y resistente, por lo que se optó por introducir las probetas en el horno durante una hora a 55°C .



Figura 4.13 Probetas con refuerzos.

4.3.4 Corte de las probetas finales

El último paso del proceso de fabricación fue el corte de las probetas a la anchura deseada, ésta se eligió algo mayor de lo común (20mm) dado el inusual espesor de las mismas. Este paso se realizó mediante una sierra de punta de diamante. Como puede apreciarse en la figura 4.14, se obtuvieron cuatro probetas de cada tipo. Por último se realizó el marcado de los distintos grupos de probetas.



Figura 4.14 De izquierda a derecha: Probetas $0/90^{\circ}$ tratadas en caliente; Probetas $0/90^{\circ}$ tratadas en frío; Probetas $\pm 45^{\circ}$ tratadas en frío; Probetas $\pm 45^{\circ}$ tratadas en caliente.

4.4 Ensayos de tracción

En esta sección se procede a introducir los datos obtenidos para los ensayos a las probetas fabricadas. Previo al análisis de dichos datos, caben destacar varios aspectos a tener en cuenta:

- Para la toma de datos no se disponía de un extensómetro que midiera la elongación en el eje transversal al eje de la carga. Por lo que algunas de las magnitudes no han podido ser cuantificadas.
- Analizando las gráficas obtenidas se ha llegado a la conclusión de que el extensómetro ha sufrido discontinuidades o “tirones” durante la toma de datos.
- Se han aplicado filtros para reducir el ruido de la señal del extensómetro, descartar valores fuera de rango y tratar de reducir el efecto las discontinuidades mencionadas anteriormente.
- El extremadamente pequeño grosor con el que se trabaja en esta industria ha originado un cierto grado de no linealidad que será tomado en consideración a la hora de cuantificar las propiedades.

4.4.1 Procedimiento

Para comenzar el ensayo se han tomado las medidas de espesor y anchura de cada una de las probetas utilizando un micrómetro y un calibre respectivamente. Dichas medidas se relacionan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Medidas reales de cada una de las probetas (Longitud calibrada 25mm).

Tipo de probeta	Número de probeta	Espesor (mm)	Anchura (mm)
Probetas 0/90° tratadas en caliente	1	0.25	20.05
	2	0.26	19.97
	3	0.28	19.99
	4	0.26	19.92
Probetas 0/90° tratadas en frío	1	0.29	20.02
	2	0.36	20.02
	3	0.34	20.06
	4	0.36	19.96
Probetas $\pm 45^\circ$ tratadas en frío	1	0.33	19.61
	2	0.38	20.03
	3	0.32	20.04
	4	0.30	20.08
Probetas $\pm 45^\circ$ tratadas en caliente	1	0.28	20.05
	2	0.25	19.98
	3	0.27	20.00
	4	0.28	19.89

En la siguiente figura se observan los instrumentos de medida y las probetas numeradas.



Figura 4.15 Probetas e instrumentos de medición.

Una vez tomadas dichas magnitudes, se introducen en el programa, en el mismo orden en que se pretenden ensayar. Por último se procede a ensayar a tracción cada una de las probetas siguiendo el orden establecido. Para este procedimiento, se ha utilizado la máquina universal de ensayos shimadzu® modelo AG-IS.

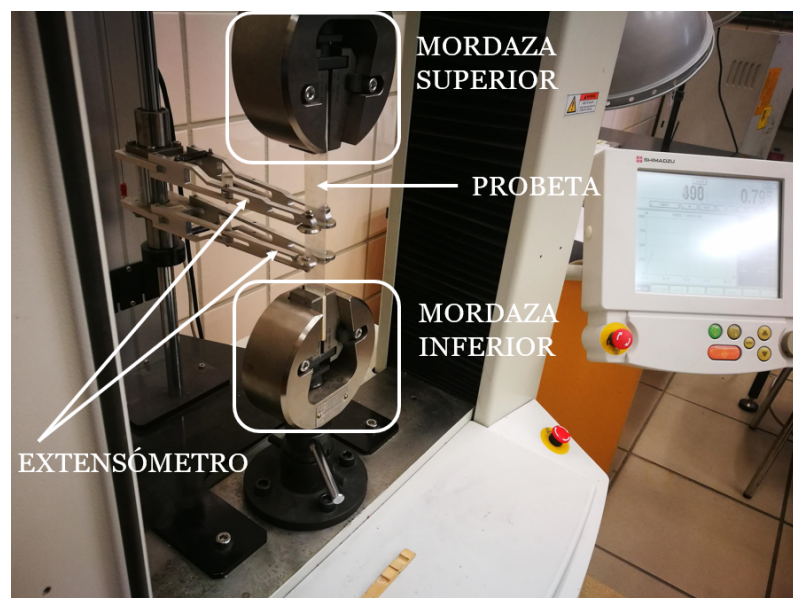


Figura 4.16 Unidad de ensayos de tracción.

En la figura 4.16 puede apreciarse el extensómetro, la probeta ya colocada y las mordazas, cuyos grados de libertad aseguran el alineamiento de la carga con el eje longitudinal de la probeta. Asimismo puede observarse a la derecha de la imagen el monitor de representación de la prueba.

4.4.2 Resultados. Constantes elásticas

Se procede en este apartado al análisis de los resultados obtenidos. Para ello se han agrupado éstos según el tipo de probeta, a saber: Probetas 0/90° tratadas en caliente y con vacío; Probetas 0/90° tratadas en frío; Probetas $\pm 45^\circ$ tratadas en frío y Probetas $\pm 45^\circ$ tratadas en caliente y con vacío. Dado que los datos se adquieren como mm de desplazamiento del extensómetro (d), para expresarlo en términos de elongación, se ha de dividir por la separación reglada de la que parte el extensómetro (d_0).

$$\varepsilon = \frac{d}{d_0}.$$

En el caso de la carga (P), para expresarla en términos de tensión, se ha de dividir dicho valor por el área de la probeta en cada caso (A_i).

$$\sigma = \frac{P}{A_i}.$$

Probetas 0/90° tratadas en caliente y con vacío

Para el tratamiento de las probetas se ha optado por la elección de un filtro simple que elimine los datos residuales de las gráficas. En la figura 4.17 pueden apreciarse las discontinuidades de las que se hablaban al inicio de esta sección.

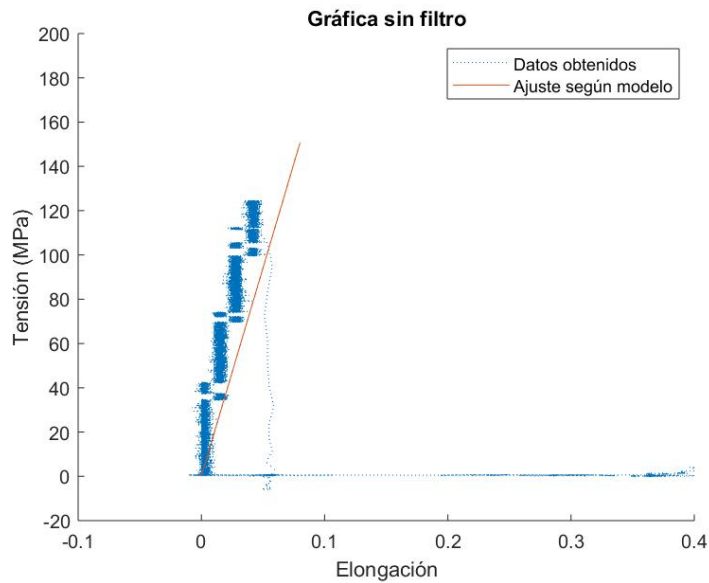


Figura 4.17 Gráfica sin filtro aplicado.

Observando la figura 4.17, también puede apreciarse que los datos residuales tienden a disminuir la pendiente de la recta de ajuste ocasionando que no aproxime de forma correcta la nube de puntos. Una vez aplicado el filtro (figura 4.18), los valores residuales son eliminados y se observa que el ajuste aproxima la gráfica de forma más adecuada.

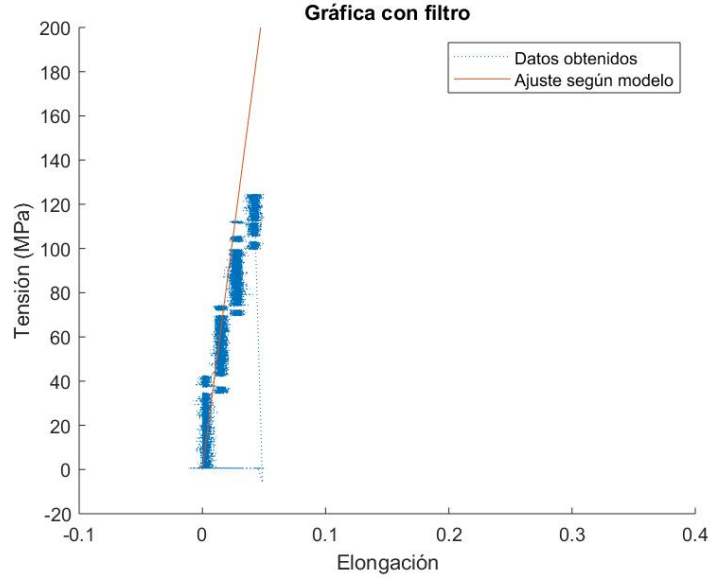


Figura 4.18 Gráfica con filtro aplicado.

En la gráfica anterior, se comenta que el ajuste utilizado ha sido realizado siguiendo un modelo, se procede a continuación a detallar el mismo.

Analizando las gráficas obtenidas para este grupo de probetas, es posible observar una ligera tendencia cuadrática. Esto es probablemente debido al pequeño espesor de las probetas y a posibles defectos en su fabricación. Al principio del ensayo el módulo de elasticidad corresponde al máximo del material y este decrece muy ligeramente a lo largo del ensayo. Para comprobar la correcta calibración del extensiómetro (a carga cero corresponde lectura de deformación cero), se fuerza que el modelo parta del origen de coordenadas. Por otro lado, para captar de forma mas precisa la tendencia parabólica de estas nubes de puntos, se ha optado por un modelo cuadrático. Por último, dado que el valor del módulo elástico que interesa es el inicial, se tomará como módulo el valor de la derivada de dicho modelo en el origen. El modelo elegido es, por tanto, de la forma:

$$y = Ax + Bx^2.$$

Del cual solo nos interesa el parámetro A, ya que

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = A.$$

Para hallar A se ha de realizar el problema de optimización que minimice la distancia ($S = \sum_i (y_i - Ax_i - Bx_i^2)^2$) del modelo a los puntos x_i e y_i de la nube de puntos, donde i va de 1 a la longitud de los vectores columna de datos. Por tanto,

$$\frac{\partial S}{\partial A} = -2 \sum_i (y_i - Ax_i - Bx_i^2)x_i = 0.$$

Operando se obtiene:

$$A \sum_i x_i^2 + B \sum_i x_i^3 = \sum_i x_i y_i \quad (4.1)$$

Por otro lado,

$$\frac{\partial S}{\partial B} = -2 \sum_i (y_i - Ax_i - Bx_i^2)x_i^2 = 0.$$

Operando de nuevo se obtiene:

$$A \sum_i x_i^3 + B \sum_i x_i^4 = \sum_i x_i^2 y_i. \quad (4.2)$$

Por tanto:

$$A = \frac{\sum_i x_i y_i \sum_i x_i^4 - \sum_i x_i^2 y_i \sum_i x_i^3}{\sum_i x_i^2 \sum_i x_i^4 - (\sum_i x_i^3)^2} \quad (4.3)$$

Una vez realizados estos cálculos para el grupo completo de probetas, se obtienen cuatro rectas cuyas pendientes difieren casi en un 60 % (figura 4.19).

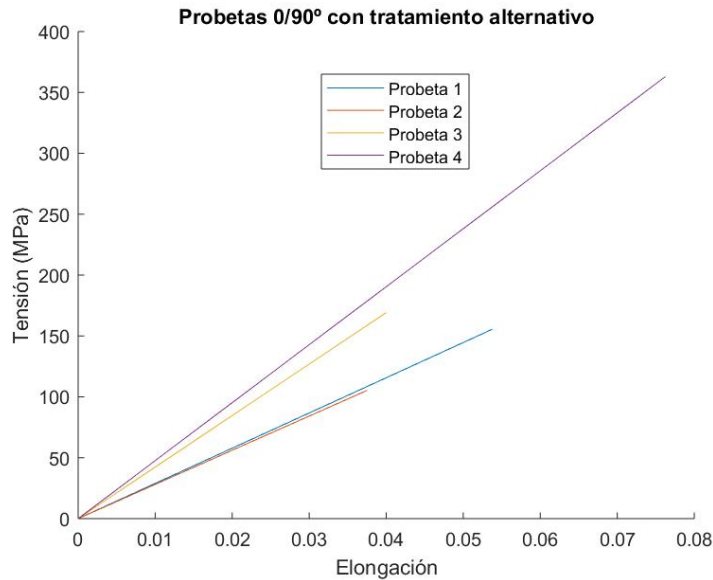


Figura 4.19 Gráfica de tratamiento de datos según modelo.

Esto nos indica que la curva obtenida por el extensómetro no parte de deformación cero. Por lo que será preciso utilizar un ajuste que tenga en cuenta esta situación. En este caso se ha optado por un modelo de mínimos cuadrados. En la figura 4.20, se aprecia la comparativa realizada entre el modelo y el ajuste por mínimos cuadrados (M.C.).

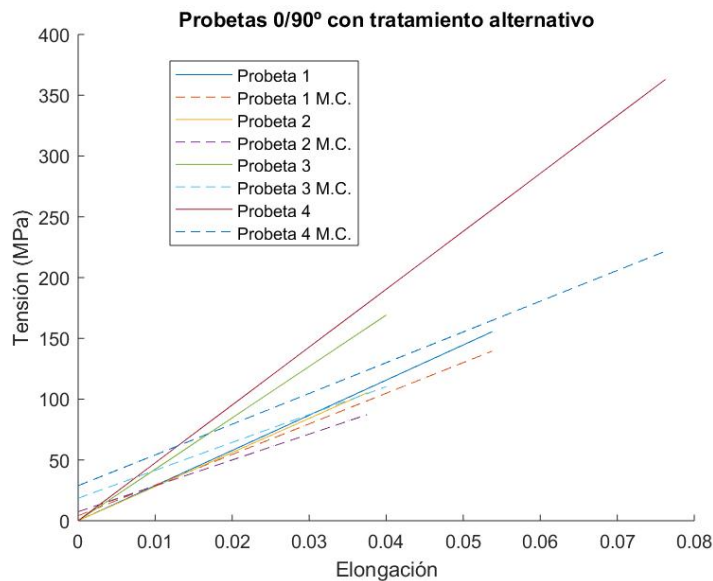


Figura 4.20 Comparativa entre el modelo y el ajuste de mínimos cuadrados.

Como puede apreciarse en la figura, las rectas de ajuste por mínimos cuadrados no cortan en el origen. Sin embargo, son casi paralelas, lo que nos indica que su pendiente o módulo elástico es similar y que el fallo es, por tanto, debido a la calibración inicial, tal como se adelantaba anteriormente. Se tomará consecuentemente la medida del módulo elástico haciendo la media de las pendientes obtenidas mediante mínimos cuadrados para cada una de las probetas.

$$E_1 = 2.51 \text{ GPa}, E_2 = 2.12 \text{ GPa}, E_3 = 2.29 \text{ GPa}, E_4 = 2.52 \text{ GPa}.$$

Su media es, por tanto:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i)}{n} = 2.37 \text{ GPa}, \quad (4.4)$$

y su desviación típica:

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i^2)}{n} - \bar{E}^2} = 0.17 \text{ GPa}. \quad (4.5)$$

Dado que la desviación típica es razonable, puede establecerse sin cometer un error excesivo que el valor del módulo de elasticidad es:

$$E_{11} = E_{22} = 2.37 \text{ GPa}.$$

Probetas 0/90° tratadas en frío

Para el grupo de probetas tratadas en frío, el proceso seguido ha sido el mismo al anterior. En la figura 4.21 puede observarse que en este caso, la dispersión es algo mayor, lo que provocará que la desviación de la medida aumente.

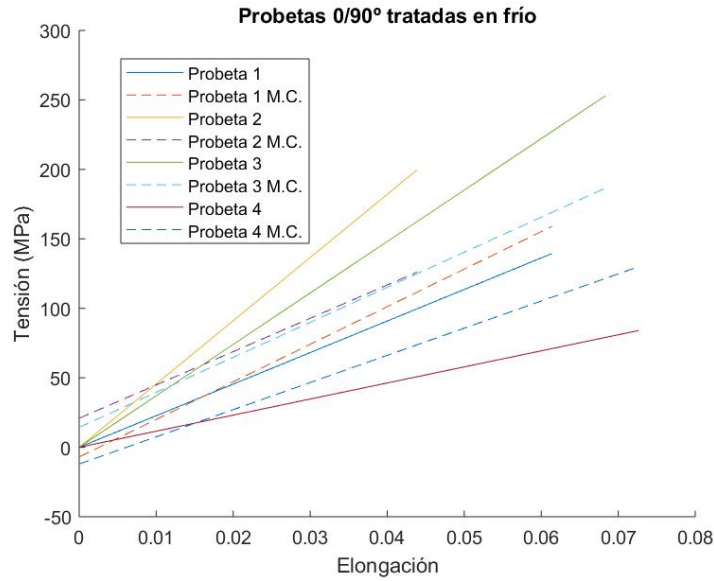


Figura 4.21 Comparativa entre el modelo y el ajuste de mínimos cuadrados.

Se tomará la medida del módulo elástico haciendo la media de las pendientes obtenidas mediante mínimos cuadrados para cada una de las probetas.

$$E_1 = 2.70 \text{ GPa}, E_2 = 2.40 \text{ GPa}, E_3 = 2.52 \text{ GPa}, E_4 = 1.96 \text{ GPa}.$$

Su media es, por tanto:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i)}{n} = 2.39 \text{ GPa}, \quad (4.6)$$

y su desviación típica:

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i^2)}{n} - \bar{E}^2} = 0.27 \text{ GPa}. \quad (4.7)$$

El valor del módulo elástico es por tanto:

$$E_{11} = E_{22} = 2.39 \text{ GPa}.$$

Valor muy similar al anterior.

Se observa, sin embargo, que la desviación típica aumenta respecto al caso anterior, esto es probablemente debido a fallos de fabricación o de captación de datos.

Probetas $\pm 45^\circ$

Dado que no se dispuso de un extensómetro perpendicular a la dirección de la carga, el cálculo del valor de ν_{12} no se ha podido realizar. Tampoco se podrá, por tanto, obtener un valor exacto de G_{12} . Para la obtención de datos se ha utilizado el método de ensayo sobre laminados equiangulares $\pm 45^\circ$, el cual se detalla en el apéndice A.

- Tratamiento en frío:

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción para las cuatro probetas a $\pm 45^\circ$ en frío se incluyen a continuación en la figura 4.22.

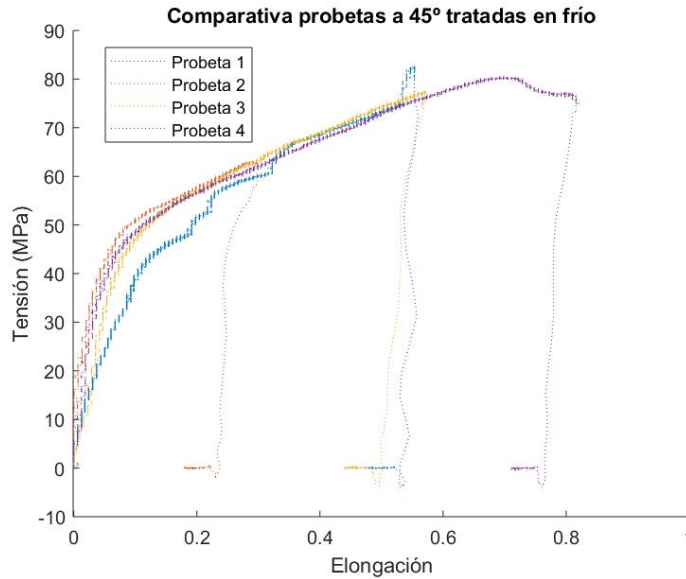


Figura 4.22 Ensayo de tracción para probetas $\pm 45^\circ$ en frío.

Se observa como rápidamente se pierde la linealidad tal como se explica en el apéndice B, ya que en probetas con orientación $\pm 45^\circ$, el mecanismo de rotura está dominado por el comportamiento de la matriz, cuyas dependencias no son lineales. En la figura 4.23 puede observarse que la matriz se ha vuelto opaca al colapsar en contraposición a lo que ocurriría en el caso $0/90$, donde se aprecia la transparencia de la matriz tras el fallo 4.25.



Figura 4.23 Probeta $\pm 45^\circ$ ensayada a tracción.

A pesar de la ausencia de un extensómetro transversal, se ha realizado una aproximación del valor de G_{12} mediante el valor de la pendiente ($K = \frac{F}{A \times \epsilon_x}$) de las anteriores curvas durante su periodo aproximadamente lineal, al que se denominará como G_{12}^* o pseudo-módulo elástico. Esta aproximación, aunque burda (se ha considerado $\epsilon_y = 0$), se ha realizado con el fin de no desperdiciar los datos obtenidos con estas probetas. La aproximación es la siguiente:

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{F}{2 \times A \times (\epsilon_x - \epsilon_y)} \sim \frac{F}{A \times \epsilon_x} = \frac{\sum_{i=1}^4 (K_i)}{4} = G_{12}^* . \quad (4.8)$$

El valor obtenido es de 0.219 *GPa*.

- Tratamiento en caliente con vacío:

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción para las cuatro probetas a $\pm 45^\circ$ en caliente con vacío se incluyen a continuación en la figura 4.24.

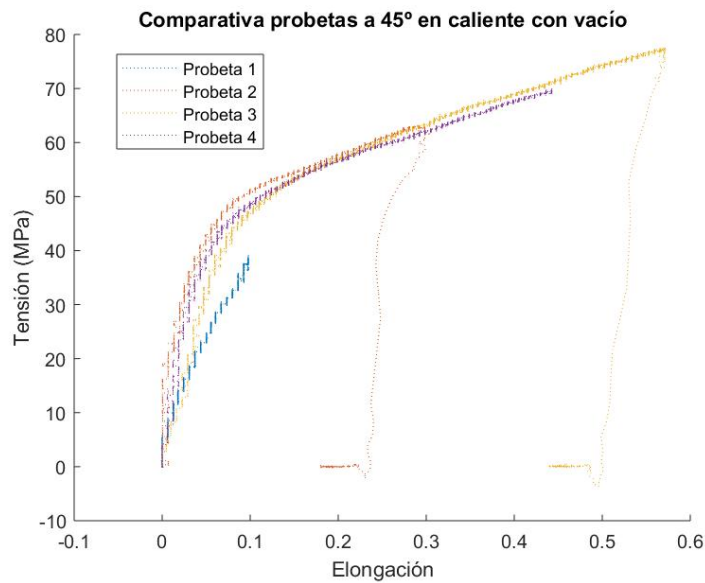


Figura 4.24 Ensayo de tracción para probetas $\pm 45^\circ$ en caliente con vacío.

Se observa como rápidamente se pierde la linealidad tal como se explica en el apéndice B, ya que en probetas con orientación ± 45 , el mecanismo de rotura está dominado por el comportamiento de la matriz, cuyas dependencias no son lineales. Puede observarse también que la probeta 1 presenta un comportamiento extraño, esto se debe a que el adhesivo que unía las probetas a los refuerzos cedió antes de la rotura de la placa.

Se ha realizado el cálculo del valor del pseudo-módulo elástico G_{12}^* mediante el método aplicado en el caso anterior cuyo valor es ahora de 0.220 GPa, casi idéntico al anterior.

4.4.3 Resultados. Tensión de rotura

En este apartado, se comparan los resultados de tensión de rotura para los ensayos de tracción en probetas a $0/90^\circ$ fabricadas en frío y mediante el proceso alternativo. Cabe destacar, previo al análisis que la práctica totalidad de las probetas fallaron en zonas próximas a la unión de los refuerzos.

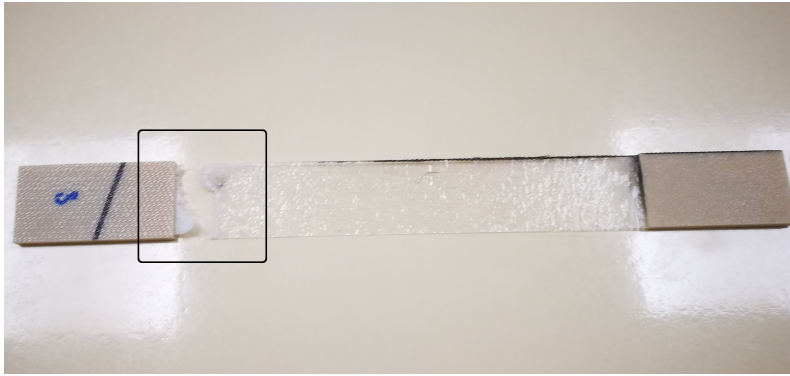


Figura 4.25 Zona de fallo de la mayoría de las probetas.

Los resultados de tensiones de rotura para las cuatro **probetas tratadas en caliente con vacío a $0/90$** son los siguientes.

$$\begin{aligned}\sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 1} &= 152.68 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 2} = 90.40 \text{ MPa}, \\ \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 3} &= 111.66 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 4} = 181.92 \text{ MPa} .\end{aligned}$$

De estas probetas, la número 2 y la número 3 fallaron debido a la mala unión del adhesivo empleado para los refuerzos, por lo que desecharemos dichos resultados.

Los resultados de tensiones de rotura para las cuatro **probetas curadas en frío a $0/90$** son los siguientes.

$$\begin{aligned}\sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 1} &= 167.07 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 2} = 131.98 \text{ MPa}, \\ \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 3} &= 171.91 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 4} = 127.03 \text{ MPa} .\end{aligned}$$

Se observa que la media de ambos grupos es parecida y que la probeta con el tratamiento alternativo número 4 ha registrado el mayor valor de tensión de rotura.

Por otro lado, los resultados de tensiones de rotura para las cuatro **probetas curadas en frío a ± 45** son los siguientes.

$$\begin{aligned}\sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 1} &= 82.67 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 2} = 63.23 \text{ MPa}, \\ \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 3} &= 77.58 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 4} = 80.62 \text{ MPa} .\end{aligned}$$

Asimismo, los resultados de tensiones de rotura para las cuatro **probetas tratadas en caliente con vacío a ± 45** son los siguientes.

$$\begin{aligned}\sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 1} &= 96.74 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 2} = 92.72 \text{ MPa}, \\ \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 3} &= 98.26 \text{ MPa}, \sigma_{\max}|_{\text{Probeta } 4} = 77.27 \text{ MPa} .\end{aligned}$$

Puede observarse que la tensión de rotura media para el caso de resina curada en frío ($\bar{\sigma}_{max} = 76.02 \text{ MPa}$) es inferior a la media obtenida para la resina tratada en caliente ($\bar{\sigma}_{max} = 90.99 \text{ MPa}$). Este comportamiento era de esperar dado que la resina curada con temperatura adquiere una mayor resistencia y como se comentó anteriormente, el comportamiento de la matriz es el que domina la rotura en este tipo de ensayos.

El cálculo de todas las tensiones está referido al área de la sección transversal al eje de carga en el estado inicial inalterado de cada probeta.

4.5 Ensayo de calcinación de resina

Por último, se ha llevado a cabo un ensayo de medición de fracciones de masa según la norma ASTM D 3171-76 mediante la técnica de calcinación de resina para averiguar qué porcentaje de resina residual se ahorra mediante la aplicación del tratamiento en caliente con vacío.

4.5.1 Procedimiento

Se comienza por programar un horno a 600°C .



Figura 4.26 Horno programado a 600°C .

Los crisoles cerámicos empleados para el ensayo se limpian con alcohol y se introducen en el horno durante media hora con el fin de eliminar la humedad. Pasada la media hora se extraen y se dejan enfriar en un desecador. Acto seguido se pesarán por separado y junto a las muestras que se han elegido para el ensayo (figura 4.27).



Figura 4.27 Pesaje de los crisoles.

Una vez hecho esto, se introducen ambos crisoles en el horno a 600°C durante hora y media, lo que calcinará la resina dejando únicamente la fibra.



Figura 4.28 Comparación del antes y después de la calcinación.

En la figura 4.28 puede apreciarse como una vez eliminada la resina, la fibra queda expuesta.

Una vez concluido este tiempo, se dejan enfriar de nuevo y se procede al pesaje final la diferencia en las medidas proporciona la masa de resina.

El pesaje se ha realizado con una precisión de diez-milésimas de gramo. El cálculo obedece a esta sencilla ecuación:

$$\text{fracción en masa} = \frac{\text{masa total-masa después de calcinación}}{\text{masa total-masa del crisol}} = \frac{\text{masa de resina}}{\text{masa de la muestra de material compuesto}}$$

4.5.2 Resultados

Los resultados obtenidos para las fracciones de masa son los siguientes:

- $f_m|_{\text{alternativo}} = 43.87\%$
- $f_m|_{\text{en frío}} = 55.85\%$.

Admitiendo que las densidades de la resina y la fibra son respectivamente: $\rho_{\text{res}} = 1100 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{\text{fib}} = 2450 \text{ kg/m}^3$, se obtienen las siguientes fracciones volumétricas:

- $f_v|_{\text{alternativo}} = 63.70\%$
- $f_v|_{\text{en frío}} = 73.80\%$.

4.6 Conclusiones

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que el mayor valor de la tensión de rotura se ha obtenido para una de las probetas fabricadas mediante el proceso alternativo ($\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{prob alt 4}} = 181.91 \text{ MPa}$). Por otro lado, en el ensayo sobre laminados equiangulares $\pm 45^\circ$, se ha obtenido una tensión de rotura media de $\sigma_{\text{max}}|_{\pm 45} = 90.99 \text{ MPa}$ para el grupo de probetas tratadas en caliente, casi un 20 % superior al caso de probetas curadas en frío. Además, se ha demostrado que la fracción volumétrica de fibra conseguida mediante el proceso alternativo es más de un 10 % menor a la obtenida mediante el curado en frío.

Se puede concluir por tanto que, debido a la poca inversión necesaria y apoyándose en los resultados obtenidos, no sería descabellado plantear la aplicación de este proceso de fabricación a la industria del surf. Además, teniendo en cuenta la actual catástrofe medioambiental que el tratamiento de residuos está provocando en el planeta, podría ser sensato una tendencia a la estandarización de procesos que, como este, reduzcan el consumo de materiales no reutilizables y peligrosos para el medio ambiente como son las resinas poliméricas.

El siguiente paso en esta investigación sería el de tratar de perfeccionar el proceso de fabricación propuesto, con el fin de seguir mejorando el rendimiento del material obtenido y aumentar la precisión en las pruebas realizadas.

Apéndice A

Determinación experimental de la rigidez de una lámina

En este apéndice se explica la base científica que hay detrás de la obtención de las características mecánicas del material mediante los ensayos que se explican en la sección 4.4.

A.1 Obtención de E_{11} , E_{22} , ν_{12}

La determinación de estas constantes experimentales se realiza mediante un simple ensayo de tracción. Dado que nuestra probeta está compuesta de fibra tejida y no unidireccional, $E_{11} \equiv E_{22}$ por lo tanto solo habremos de hacer un ensayo para hallar estas. La tracción ha de hacerse siguiendo una de las direcciones principales de las fibras.

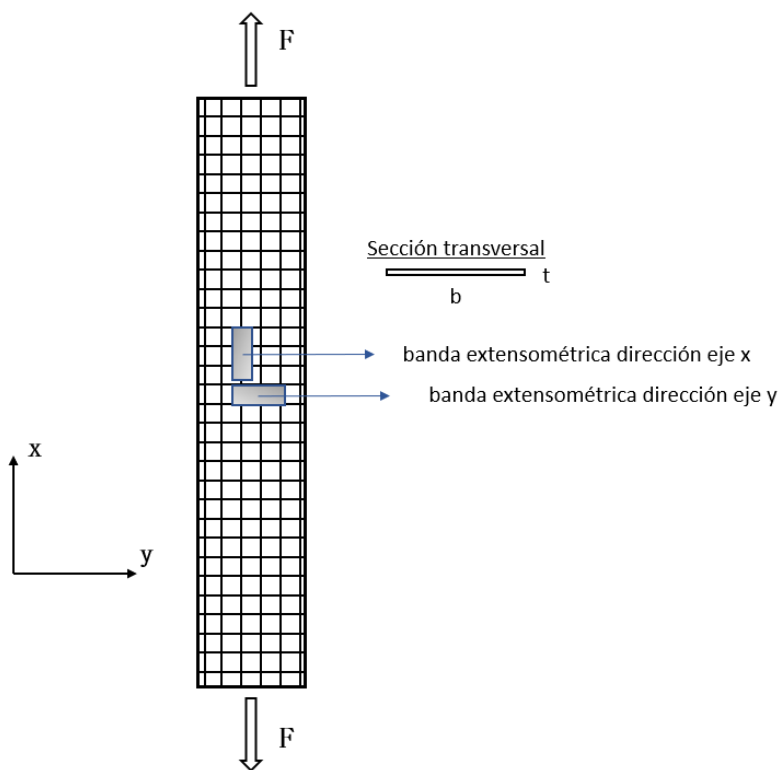


Figura A.1 Esquema del ensayo de tracción para la obtención de E_{11} , E_{22} , ν_{12} .

Ambas galgas permiten medir las deformaciones ϵ_x y ϵ_y cuando la probeta se somete a tracción. Sabiendo éstas y la carga, podremos averiguar el valor de $E_{11} \equiv E_{22}$ y ν_{12} .

En efecto, cuando la probeta se somete a una tracción de valor F , el tensor de tensiones viene dado por $\sigma_x = F/A$, donde $A = b \times t$, sección transversal de la probeta.

Usando las ecuaciones constitutivas de la elasticidad llegamos a la siguiente ecuación.

$$\epsilon_x = \sigma_x \times E_{11} ,$$

$$\epsilon_y = -(\nu_{12}/E_{11}) \times \sigma_x ,$$

$$\gamma_{xy} = 0.$$

De donde se obtiene:

$$E_{11} = E_{22} = \sigma_x / \epsilon_x ,$$

$$\nu_{12} = -\epsilon_y / \epsilon_x .$$

A.2 Obtención de G_{12}

El método más exacto para la obtención del G_{12} es el denominado “ensayo de torsión sobre tubos”, sin embargo, existen otros métodos que permiten obtener muy buenas aproximaciones de esta constante y no son tan laboriosos como éste, por lo que no se extenderá aquí.

Uno de estos procesos es el ensayo sobre laminados equiangulares $\pm 45^\circ$. La base de este ensayo es someter a tracción un laminado con fibras a $\pm 45^\circ$. Esta disposición consigue que los efectos derivados de la deformación angular se cancelen entre sí.

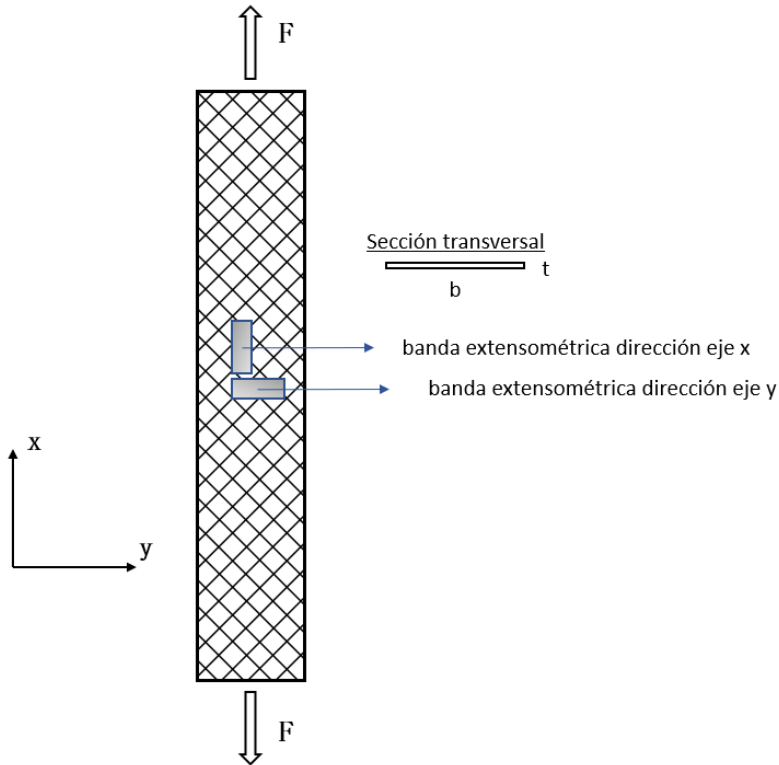


Figura A.2 Esquema del ensayo de tracción para la obtención de G_{12} .

En este ensayo, G_{12} puede ser evaluado de la medida tomada por dos galgas posicionadas entre sí a noventa grados. Las galgas se colocarán de forma que una de ellas siga la dirección de la carga, es decir, el eje x . A

partir de ahí, la deformación se obtiene mediante la transformación del sistema de ejes x-y al sistema 1-2.

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y$$

La carga aplicada provocará una tensión normal $\sigma_x = F/A$ donde A vuelve a ser la sección transversal. La transformación de este tensor al sistema 1-2 (sistema de ortotropía) nos da el valor $\sigma_{12} = F/2 \times A$. Conocido σ_{12} y γ_{12} la ley constitutiva nos da la siguiente relación.

$$G_{12} = \sigma_{12}/\gamma_{12}$$

.

Apéndice B

Determinación experimental de la resistencia de una lámina

En este caso, se trata de averiguar las siguientes características.

- $X_t \equiv$ Resistencia a la tracción en la dirección de las fibras.
- $Y_t \equiv$ Resistencia a la tracción en la dirección transversal a las fibras.
- $S \equiv$ Resistencia a cortadura.

Dado que el material está compuesto de refuerzos de fibra tejida, no se distinguirá entre dirección de la fibra y perpendicular a la misma.

B.1 Obtención de X_t

Al igual que para la rigidez, la obtención de esta propiedad, se obtiene mediante la realización de un ensayo de tracción (figura B.1).

De esta forma, el valor de la resistencia de tracción será

$$X_t = \sigma_{11}|_{F=F_{ult}} = F_{ult}/A$$

.

B.2 Obtención de S

En el caso de la resistencia a cortadura, la suposición de linealidad no resulta una buena aproximación. Ya que, para esfuerzos tangenciales, los mecanismos de propagación de grietas están generalmente dominados por el comportamiento de la matriz sin afectar a las fibras.

El comportamiento de la matriz, el cual es no lineal, dependerá de la concentración de tensiones que introducen la presencia de fibras y huecos en la misma. Los ensayos para determinar la resistencia a cortadura son similares a los utilizados para determinar G_{12} , ya explicados en el apéndice anterior.

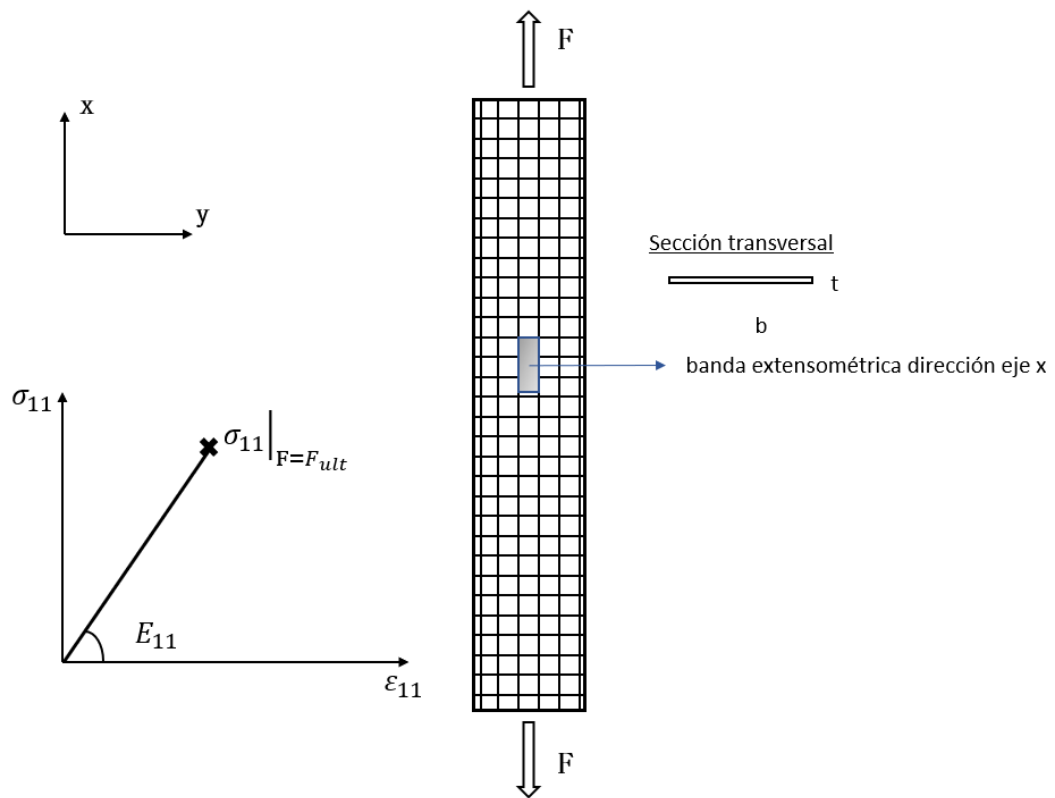


Figura B.1 Esquema del ensayo de tracción para la obtención de X_t .

Apéndice C

Código de MatLab para tratamiento de datos

En este apéndice se incluye el código utilizado para el tratamiento de datos de cada uno de los grupos de probetas. El procedimiento al variar el grupo sería el mismo para el resto de probetas cambiando los comandos de carga de datos.

Código C.1 Código para tratamiento de datos.

```
%% CÓDIGO PARA TRATAMIENTO DE DATOS / OBTENCIÓN DE FIGURAS %%
clear all;close all; clc
%% Carga de los valores desde los archivos excel

alt1090 = xlsread('frio1090.xlsx','Sheet1','A3:D22506');
alt2090 = xlsread('frio2090.xlsx','Sheet1','A3:D17872');
alt3090 = xlsread('frio3090.xlsx','Sheet1','A3:D24425');
alt4090 = xlsread('frio4090.xlsx','Sheet1','A3:D30242');
areas = xlsread('ensayo.xlsx','Hoja1','B12:C27'); % col1==esp//col2==ancho.
% Quedan matrices de 4 columnas: 1ª columna, tiempo de ensayo (s); 2ª
% columna, carga (N), 3ª columna, movimiento total de la máquina (mm), 4ª
% columna lectura del extensómetro (décimas de mm). <--Corrección.

%% Obtención de datos / paso a tensión/elongación

area=areas(:,1).*areas(:,2);

Probeta1 = [];
Probeta1(:,1) = alt1090(:,2); %carga
% Para obtener la tensión dividimos por área.
Probeta1(:,1) = Probeta1(:,1)/area(5); % Tensión
Probeta1(:,2) = alt1090(:,4); %desplazamiento extensómetro (en mm)
% Para obtener elongación dividimos por d_0=25mm
Probeta1(:,2) = Probeta1(:,2)/25; % elongación

Probeta2 = [];
Probeta2(:,1) = alt2090(:,2); %carga
% Para obtener la tensión dividimos por área.
Probeta2(:,1) = Probeta2(:,1)/area(6); % Tensión
Probeta2(:,2) = alt2090(:,4); %desplazamiento extensómetro (en mm)
% Para obtener elongación dividimos por d_0=25mm
Probeta2(:,2) = Probeta2(:,2)/25; % elongación

Probeta3 = [];
Probeta3(:,1) = alt3090(:,2); %carga
```

```

% Para obtener la tensión dividimos por área.
Probeta3(:,1) = Probeta3(:,1)/area(7); % Tensión
Probeta3(:,2) = alt3090(:,4); %desplazamiento extensómetro (en mm)
% Para obtener elongación dividimos por d_0=25mm
Probeta3(:,2) = Probeta3(:,2)/25; % elongación

Probeta4 = [];
Probeta4(:,1) = alt4090(:,2); %carga
% Para obtener la tensión dividimos por área.
Probeta4(:,1) = Probeta4(:,1)/area(8); % Tensión
Probeta4(:,2) = alt4090(:,4); %desplazamiento extensómetro (en mm)
% Para obtener elongación dividimos por d_0=25mm
Probeta4(:,2) = Probeta4(:,2)/25; % elongación

%% Ejemplo dispersión de puntos / Medidas fuera de rango

figure(1); hold on;
plot(Probeta3(:,2),Probeta3(:,1),':')
% y=C(1)*x+C(2);
x=Probeta3(:,2);
y=Probeta3(:,1); % parte lineal del ajuste cuadrático que pasando por el
%origen, aproxima la nube de puntos. y = Ax + B^2
A1(1)=((x'*y)*sum(x.^4)-((x.^2)*y)*sum(x.^3))/(sum(x.^2)*sum(x.^4)-(sum(x.^3)
.^2));
x=linspace(0,0.08);
y=x*A1(1);
plot(x,y)

axis([-0.1 0.4 -20 200])

ylabel('Tensión (MPa)')
xlabel('Elongación')

title('Gráfica sin filtro')
legend('Datos obtenidos','Ajuste según modelo')

hold off

%% Filtro simple

% eliminación elongaciones superiores a la de rotura (Elongación>1.25*max)
% eliminación datos obtenidos con carga residual (Tensión<0.5MPa)

max(Probeta1(:,1));
aux=max(find(Probeta1(:,1)==max(Probeta1(:,1)))));
maxd=Probeta1(aux,2);
l=length(Probeta1(:,2));
k=1;
while k<=l
if abs(Probeta1(k,2))>maxd*1.25 && abs(Probeta1(k,1))<0.5
Probeta1(k,:)=[];
l=l-1;
else
k=k+1;
end

```



```

end

max(Probeta2(:,1));
aux=max(find(Probeta2(:,1)==max(Probeta2(:,1))));
maxd=Probeta2(aux,2);
l=length(Probeta2(:,2));
k=1;
while k<=l
if abs(Probeta2(k,2))>maxd*1.25 || abs(Probeta2(k,1))<0.5
Probeta2(k,:)=[];
l=l-1;
else
k=k+1;
end
end

max(Probeta3(:,1));
aux=max(find(Probeta3(:,1)==max(Probeta3(:,1))));
maxd=Probeta3(aux,2);
l=length(Probeta3(:,2));
k=1;
while k<=l
if abs(Probeta3(k,2))>maxd*1.25 || abs(Probeta3(k,1))<0.5
Probeta3(k,:)=[];
l=l-1;
else
k=k+1;
end
end

max(Probeta4(:,1));
aux=max(find(Probeta4(:,1)==max(Probeta4(:,1))));
maxd=Probeta4(aux,2);
l=length(Probeta4(:,2));
k=1;
while k<=l
if abs(Probeta4(k,2))>maxd*1.25 || abs(Probeta4(k,1))<0.5
Probeta4(k,:)=[];
l=l-1;
else
k=k+1;
end
end

%% Ejemplo con filtro dispersión de puntos / Medidas fuera de rango

figure(3); hold on;
plot(Probeta3(:,2),Probeta3(:,1),'r')
%  $y=C(1)*x+C(2)$ ;
x=Probeta3(:,2);
y=Probeta3(:,1); % parte lineal del ajuste cuadrático que pasando por el
%origen, aproxima la nube de puntos.  $y = Ax + B^2$ 
A1(1)=((x'*y)*sum(x.^4)-((x.^2)'*y)*sum(x.^3))/(sum(x.^2)*sum(x.^4)-(sum(x.^3)
.^2));
x=linspace(0,0.08);
y=x*A1(1);
plot(x,y)

```

```

axis([-0.1 0.4 -20 200])

ylabel('Tensión (MPa)')
xlabel('Elongación')

title('Gráfica con filtro')
legend('Datos obtenidos','Ajuste según modelo')

hold off
%% Comparación de probetas

figure(2); hold on

max(Probeta1(:,1));
aux=max(find(Probeta1(:,1)==max(Probeta1(:,1)))));
maxd=Probeta1(aux,2);
xaux=linspace(0,maxd);
x=Probeta1(:,2);
y=Probeta1(:,1); % parte lineal del ajuste cuadrático que pasando por el
%origen, aproxima la nube de puntos.  $y = Ax + B^2$ 
A1(1)=((x'*y)*sum(x.^4)-((x.^2)*y)*sum(x.^3))/(sum(x.^2)*sum(x.^4)-(sum(x.^3)^2));
yaux=A1(1).*xaux;
plot(xaux,yaux)
C=polyfit(Probeta1(:,2),Probeta1(:,1),1); % Ajuste mínimos cuadrados
% de la nube de puntos.
A2(1)=C(1);
y=C(1)*xaux+C(2);
plot(xaux,y,'--')

max(Probeta2(:,1));
aux=max(find(Probeta2(:,1)==max(Probeta2(:,1)))));
maxd=Probeta2(aux,2);
xaux=linspace(0,maxd);
x=Probeta2(:,2);
y=Probeta2(:,1); % parte lineal del ajuste cuadrático que pasando por el
%origen, aproxima la nube de puntos.  $y = Ax + B^2$ 
A1(2)=((x'*y)*sum(x.^4)-((x.^2)*y)*sum(x.^3))/(sum(x.^2)*sum(x.^4)-(sum(x.^3)^2));
yaux=A1(2).*xaux;
plot(xaux,yaux)
C=polyfit(Probeta2(:,2),Probeta2(:,1),1); % Ajuste mínimos cuadrados
% de la nube de puntos.
A2(2)=C(1);
y=C(1)*xaux+C(2);
plot(xaux,y,'--')

max(Probeta3(:,1));
aux=max(find(Probeta3(:,1)==max(Probeta3(:,1)))));
maxd=Probeta3(aux,2);
xaux=linspace(0,maxd);
x=Probeta3(:,2);
y=Probeta3(:,1); % parte lineal del ajuste cuadrático que pasando por el
%origen, aproxima la nube de puntos.  $y = Ax + B^2$ 
A1(3)=((x'*y)*sum(x.^4)-((x.^2)*y)*sum(x.^3))/(sum(x.^2)*sum(x.^4)-(sum(x.^3)^2));

```

```

yaux=A1(3).*xaux;
plot(xaux,yaux)
C=polyfit(Probeta3(:,2),Probeta3(:,1),1); % Ajuste mínimos cuadrados
% de la nube de puntos.
A2(3)=C(1);
y=C(1)*xaux+C(2);
plot(xaux,y,'--')

max(Probeta4(:,1));
aux=max(find(Probeta4(:,1)==max(Probeta4(:,1)))));
maxd=Probeta4(aux,2);
xaux=linspace(0,maxd);
x=Probeta4(:,2);
y=Probeta4(:,1); % parte lineal del ajuste cuadrático que pasando por el
%origen, aproxima la nube de puntos.  $y = Ax + B^2$ 
A1(4)=((x'*y)*sum(x.^4)-((x.^2)*y)*sum(x.^3))/(sum(x.^2)*sum(x.^4)-(sum(x.^3)
.^2));
yaux=A1(4).*xaux;
plot(xaux,yaux)
C=polyfit(Probeta4(:,2),Probeta4(:,1),1); % Ajuste mínimos cuadrados
%de la nube de puntos.
A2(4)=C(1);
y=C(1)*xaux+C(2);
plot(xaux,y,'--')

ylabel('Tensión (MPa)')
xlabel('Elongación')

title('Probetas 0/90° tratadas en frío')
legend('Probeta 1','Probeta 1 M.C.','Probeta 2','Probeta 2 M.C.','Probeta 3','
Probeta 3 M.C.','Probeta 4','Probeta 4 M.C.')
hold off

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% OBTENCIÓN DE TENSIÓN DE ROTURA

fmax = xlsread('ensayo.xlsx','Hoja1','J32:J47')

areas = xlsread('ensayo.xlsx','Hoja1','B12:C27');
%col1==espesor/col2==ancho
area=areas(:,1).*areas(:,2)

for i=1:16
tmax(i)=fmax(i)/area(i);
end
tmax

```


Bibliografía

- [1] Farhana Afroz, Amy W Lang, Maria L. Habegger, Robert Hueter, and Philip Motta, *Laminar and Turbulent Boundary Layer Separation Control of Mako Shark Skin*, (2017).
- [2] Dane Ashley Hantz, *STRINGERLESS SURFBOARD WITH CHANNELS*, 2015.
- [3] Thomas E. Blake, *United States Patent Office*, 1931, pp. 620–622.
- [4] Dale C. Carson, *DRAG REDUCTION SYSTEM AND METHOD*, 2006.
- [5] Hayden Charles Cox, *SURFBOARD AND METHOD OF CONSTRUCTION*, 2010, p. 8.
- [6] Douglas James Simpson, *HIGH-LIFT, LOW DRAG FIN FOR SURFBOARD AND OTHER WATER-CRAFT*, 2005.
- [7] Conner JR. Edison S., *SURFBOARD HAVING A HONEYCOMB CORE*, 2006, pp. 19–22.
- [8] Chris Gibson and Andrew Warren, *Making surfboards: Emergence of a trans-pacific cultural industry*, *The Journal of Pacific History* **49** (2014), no. 1, 1–25.
- [9] Aitor Hernandez Michelena, Jasper Graham-Jones, Wayne Hall, and John Summerscales, *Eco-friendly Flax Fibre/Epoxy Resin/Composite System for Surfboard Production*, *RILEM Bookseries* **12** (2016), 139–154.
- [10] M. D. Ibrahim, S. N. A. Amran, Y. S. Yunus, M. R. A. Rahman, M. Z. Mohtar, L. K. Wong, and A. Zulkharnain, *The Study of Drag Reduction on Ships Inspired by Simplified Shark Skin Imitation*, *Applied Bionics and Biomechanics* **2018** (2018), 1–11.
- [11] J. M. Johnstone, *Flexural testing of sustainable and alternative materials for surfboard construction , in comparison to current industry standard materials*, *The Plymouth Student Scientist*, **4** (2010), no. 1, 109–142.
- [12] Michael D. McDonald and Stanley A. Pleskunas, *SOFT DECK SURFBOARD*, 1978.
- [13] Thomas McGregor and Samuel Wills, *Surfing a wave of economic growth*, (2017), no. March.
- [14] Morgan Robert, Vollweiler Gotz, and Vissing Klaus, *SURFACE, METHOD FOR THE PRODUCTION THEROF AND AN OBJECT PROVIDED WITH SAID SURFACE*, 2003.
- [15] F. París, J. Cañas, J.C. Marín, and A. Barroso, *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*, Publicaciones, Sección de Ingenieros, Escuela Técnica Superior de Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [16] Daniel Pene MacDonald, *SURFBOARD*, 2014.
- [17] Buyung Kosasih Reece D. Gately, Stephen Beirne, Geoff Latimer, Matthew Shirlaw, Andrew Warren, Julie R. Steele, and Marc in het Panhuis, *Additive Manufacturing, Modeling and Performance Evaluation of 3D Printed Fins for Surfboards*, (2017), 913–920.

- [18] Steven M. Lee, *LATERAL FOIL SYSTEM FOR SURFBOARDS*, 2018.
- [19] Robert C. Tinkler and Michael R. Tinkler, *SURFBOARD WITH RESILIENT TAIL*, 1976, pp. 595–599.
- [20] Yoshihiro Watanabe, *ARTICLE SUCH AS SURFBOARD AND PRODUCTION METHOD THEREOF*, 2009.
- [21] De Yuan Zhang, Yue Hao Luo, Xiang Li, and Hua Wei Chen, *Numerical simulation and experimental study of drag-reducing surface of a real shark skin*, *Journal of Hydrodynamics* **23** (2011), no. 2, 204–211.

Índice de Figuras

1.1	Recreaciones de las tres tablas más populares de acuerdo a escritos originales de los primeros siglos de la era cristiana	2
1.2	Recreación moderna de una <i>Paipo</i>	2
1.3	Esqueleto interno de la invención de Tom Blake	3
1.4	Tablas Malibú	4
1.5	MR twinfin surfboard	5
1.6	Mecanizado mediante CNC	5
1.7	Bottom turn	7
2.1	Montura del set de quillas y detalle de quillas central y lateral	9
2.2	Montura de la quilla en el lateral de la tabla	10
2.3	Líneas de corriente entorno a la quilla y la tabla	10
2.4	Sección transversal de la tabla con el sistema de soplado	10
2.5	Esquema de la superficie a nivel microscópico	11
2.6	Estructura propuesta por Watanabe	11
2.7	Aplicación de panel de abeja en la tabla	12
2.8	Secciones longitudinal y transversal	12
2.9	Parabolic carbon rails	13
2.10	Propuesta de Dane A. Hantz	14
2.11	Detalle de los surcos	14
2.12	Sección de la unión entre ambas partes	14
2.13	Disposición de los refuerzos	15
3.1	Comparación en el ensayo	17
3.2	Previo a la laminación del <i>deck</i> y producto terminado (dcha)	18
3.3	a) y b) CFD de las quillas a un ángulo de guiñada de 15°. c) Diseño asistido por ordenador de la quilla	19
3.4	Dentículos	20
3.5	Vista lateral y en planta del modelo de dentículo	20
3.6	Comparación de las dos superficies	21
3.7	Comparación dentículo real y escaneado	22
3.8	Simplificaciones	22
3.9	Magnitud de la vorticidad en la superficie suave y la piel de tiburón	23
4.1	Colocación de la fibra en el laminado de tablas	25
4.2	Aplicación de la resina	26
4.3	Modelado 3D aproximado de la probeta	26
4.4	Alzado y planta de la probeta	27
4.5	Captura del visor del instrumento de medición	28
4.6	Resina utilizada en el proceso	28
4.7	Fibra impregnada a 0° (izquierda) y a $\pm 45^\circ$ (derecha)	29
4.8	Desmoldeante y sellador perimetral de la placa. Fibra impregnada a 0° (izquierda) y a $\pm 45^\circ$ (derecha)	30

4.9	Placa con el aireador y las bases de las válvulas colocadas	30
4.10	Placa con la bolsa sellada en su perímetro y con las válvulas colocadas	30
4.11	Aplicación del vacío	31
4.12	Octavo paso del proceso alternativo	31
4.13	Probetas con refuerzos	32
4.14	De izquierda a derecha: Probetas 0/90° tratadas en caliente; Probetas 0/90° tratadas en frío; Probetas $\pm 45^\circ$ tratadas en frío; Probetas $\pm 45^\circ$ tratadas en caliente	32
4.15	Probetas e instrumentos de medición	34
4.16	Unidad de ensayos de tracción	34
4.17	Gráfica sin filtro aplicado	35
4.18	Gráfica con filtro aplicado	36
4.19	Gráfica de tratamiento de datos según modelo	37
4.20	Comparativa entre el modelo y el ajuste de mínimos cuadrados	37
4.21	Comparativa entre el modelo y el ajuste de mínimos cuadrados	38
4.22	Ensayo de tracción para probetas $\pm 45^\circ$ en frío	39
4.23	Probeta $\pm 45^\circ$ ensayada a tracción	40
4.24	Ensayo de tracción para probetas $\pm 45^\circ$ en caliente con vacío	40
4.25	Zona de fallo de la mayoría de las probetas	41
4.26	Horno programado a 600°C	42
4.27	Pesaje de los crisoles	42
4.28	Comparación del antes y después de la calcinación	43
A.1	Esquema del ensayo de tracción para la obtención de E_{11} , E_{22} , ν_{12}	45
A.2	Esquema del ensayo de tracción para la obtención de G_{12}	46
B.1	Esquema del ensayo de tracción para la obtención de X_t	50

Índice de Tablas

3.1	Datos obtenidos para los dos sujetos	19
3.2	Eficiencia frente a velocidad media	23
4.1	Medidas reales de cada una de las probetas (Longitud calibrada 25mm)	33